



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“ESTANDARIZACIÓN DEL DISEÑO DE SECADEROS
POR ASPERSIÓN DE MATERIALES PASTOSOS”**

JAVIER ENRIQUE ORNA CHÁVEZ

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO MECÁNICO

RIOBAMBA – ECUADOR

2012

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

Marzo, 20 del 2012

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

JAVIER ENRIQUE ORNA CHÁVEZ

Titulada:

**“ESTANDARIZACIÓN DEL DISEÑO DE SECADEROS POR ASPERSIÓN DE
MATERIALES PASTOSOS”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Geovanny Novillo A.
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Gilberto Zabala N.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Ramiro Valenzuela S.
ASESOR DE TESIS

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: JAVIER ENRIQUE ORNA CHÁVEZ

TÍTULO DE LA TESIS: “ESTANDARIZACIÓN DEL DISEÑO DE
SECADEROS POR ASPERSIÓN DE
MATERIALES PASTOSOS”

Fecha de Examinación: Marzo, 06 del 2012

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Telmo Moreno R. (Presidente Trib. Defensa)			
Ing. Gilberto Zabala N. (Director de Tesis)			
Ing. Ramiro Valenzuela S. (Asesor)			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

f) Presidente del Tribunal

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

f) Javier Enrique Orna Chávez

DEDICATORIA

A mis padres Celio Enrique - Emérita Piedad, mi hermano José Luis y una persona muy especial, Irene quiénes, con su amor, comprensión y paciencia han sido fuente de inspiración vital y pilares fundamentales para mi formación académica.

Al igual que a mis familiares, profesores, amigos y a todas las personas que de una u otra manera me brindaron su apoyo.

Javier Enrique Orna Chávez

AGRADECIMIENTO

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarme la oportunidad de obtener una profesión y ser una persona útil a la sociedad.

Y en especial para todos mis familiares, profesores, amigos, y personas que me ayudaron a culminar con éxito una etapa de mi vida.

Javier Enrique Orna Chávez

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación técnico-económica.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	2
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	2
 2. MARCO TEÓRICO. DESCRIPCIÓN DEL(OS) PROCESO(S) DE SECADO POR ASPERSIÓN.....	 4
2.1 Secado.....	4
2.1.1 <i>Características de un proceso de secado</i>	4
2.1.2 <i>Criterios para la selección del método de secado</i>	5
2.1.3 <i>Parámetros a considerar en el proceso de secado</i>	9
2.2 Proceso de secado por atomización.....	11
2.2.1 <i>Secuencia del proceso de secado por atomización</i>	12
2.2.2 <i>Tipos de atomizadores</i>	13
2.2.3 <i>Componentes del secadero por aspersión</i>	16
2.2.4 <i>Variables que intervienen en el proceso de secado por aspersión</i>	17
2.3 Generación de aire caliente.....	18
2.3.1 <i>Quemadores</i>	20
2.3.2 <i>Resistencias eléctricas</i>	21
2.4 Sistema de alimentación de pasta.....	21
2.4.1 <i>Tipos de bombas</i>	22
2.4.2 <i>Parámetros de funcionamiento de bombas de alimentación</i>	24
2.5 Boquillas de presión.....	25
2.5.1 <i>Tipos de boquillas</i>	25
2.5.2 <i>Disposición de boquillas</i>	27
2.5.3 <i>Capacidad y ángulo de pulverización</i>	28
2.6 Discos rotatorios.....	29

2.7	Sistema de recolección de polvo.....	29
2.7.1	<i>Principio de funcionamiento.....</i>	31
2.7.2	<i>Ventajas de los ciclones.....</i>	31
2.7.3	<i>Desventajas de los ciclones.....</i>	32
2.7.4	<i>Tipos de ciclones.....</i>	32
3.	CONDICIONES REQUERIDAS EN EL PROCESO	
	DE SECADO POR ASPERSIÓN.....	34
3.1	Análisis del proceso de secado por atomización.....	34
3.1.1	<i>Consideraciones iniciales.....</i>	35
3.1.2	<i>Determinación de las condiciones de entrada del producto.....</i>	37
3.1.3	<i>Requerimiento del producto deshidratado.....</i>	38
3.2	Sistema de transporte de la solución líquida.....	38
3.2.1	<i>Determinación de las sustancias a secar por aspersión.....</i>	39
3.2.2	<i>Determinación de las propiedades requeridas del producto.....</i>	39
3.3	Requerimientos del aire para el secado.....	40
3.4	Sistema de pulverización de la pasta de alimentación.....	41
3.4.1	<i>Análisis de los sistemas de pulverización.....</i>	42
3.5	Sistema de separación de polvos.....	43
3.5.1	<i>Consideraciones iniciales.....</i>	44
3.5.2	<i>Dimensionamiento del ciclón.....</i>	44
4.	DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA DE SECADO	
	Y EQUIPOS AUXILIARES.....	47
4.1	Dimensiones de la cámara de secado.....	47
4.1.1	<i>Cálculo del flujo de aire necesario para la evaporación.....</i>	48
4.1.2	<i>Diámetro Sauter.....</i>	54
4.1.3	<i>Diámetro, humedad y temperatura de la gota en el punto crítico....</i>	55
4.1.4	<i>Humedad y temperatura del aire en el punto crítico.....</i>	59
4.1.5	<i>Tiempo de secado.....</i>	60
4.1.6	<i>Tiempo de viaje de la gota a la pared de la cámara de secado.....</i>	64
4.1.7	<i>Calor transferido a la gota durante el tiempo de viaje.....</i>	67
4.1.8	<i>Dimensiones de la cámara de secado.....</i>	68

4.1.9	<i>Eficiencia térmica del secador por aspersión.....</i>	69
4.2	Dimensionamiento de equipos auxiliares.....	69
4.2.1	<i>Dimensionamiento del quemador.....</i>	69
4.2.2	<i>Dimensionamiento de bombas de alimentación.....</i>	74
4.2.2.1	<i>Cálculo de la altura útil efectiva.....</i>	74
4.2.3	<i>Dimensionamiento del ventilador principal.....</i>	79
4.2.3.1	<i>Dimensionamiento del ducto de impulsión.....</i>	79
4.2.3.2	<i>Cálculo de la caída de presión.....</i>	81
4.2.4	<i>Dimensionamiento del ciclón.....</i>	82
4.2.4.1	<i>Cálculo de la eficiencia del ciclón.....</i>	84
4.2.4.2	<i>Cálculo de la caída de presión del ciclón.....</i>	86
4.2.5	<i>Selección del ventilador de extracción.....</i>	87
5.	DISEÑO DEL SOFTWARE DE ESTANDARIZACIÓN	
	DE SECADEROS POR ASPERSIÓN.....	89
5.1	Diseño de software de estandarización.....	89
5.1.1	<i>Consideraciones iniciales.....</i>	89
5.1.2	<i>Desarrollo del entorno de ingreso de datos.....</i>	91
5.1.3	<i>Desarrollo del entorno de dimensionamiento de la cámara de secado y equipos auxiliares.....</i>	95
5.1.3.1	<i>Características del ventilador y calefactor.....</i>	96
5.1.3.2	<i>Características de la bomba de alimentación.....</i>	99
5.1.3.3	<i>Dimensionamiento del ciclón.....</i>	100
5.1.3.4	<i>Características del ventilador de extracción.....</i>	101
5.1.4	<i>Desarrollo del entorno de salida de datos.....</i>	103
5.1.5	<i>Instalación del software SprayDryer.....</i>	105
5.1.5.1	<i>Requisitos para la instalación.....</i>	105
5.1.5.2	<i>Guía de instalación.....</i>	106
5.2	Análisis de costos.....	110
5.2.1	<i>Costos directos.....</i>	111
5.2.2	<i>Costos indirectos.....</i>	114
5.3	Validación del software.....	114

6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
6.1	Conclusiones.....	117
6.2	Recomendaciones.....	119

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA

LINKOGRAFÍA

ANEXOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1 Intervalo de eficiencia de remoción para las diferentes familias de ciclones.....	33
2 Características de los ciclones de alta eficiencia.....	45
3 Consideraciones para la elección del combustible.....	70
4 Factores de reducción de la potencia térmica por altitud.....	72
5 Poder calorífico de combustibles.....	73
6 Parámetros de diseño para los ciclones de entrada tangencial.....	83
7 Presentación de costos totales.....	111
8 Presentación de costo de equipos	112
9 Presentación de costo de equipos	113
10 Presentación de costo de mano de obra.....	113
11 Presentación de costos directos.....	114
12 Comparación de resultados con secadero ATM 12.....	115

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
1	Curva de velocidad de secado.....	5
2	Secadero por aspersión industrial	11
3	Mecanismo de secado.....	12
4	Atomizador centrífugo.....	13
5	Atomizador a presión.....	14
6	Atomizador neumático.....	14
7	Tipos de contacto aire-gota.....	16
8	Componentes de un secadero por aspersión.....	16
9	Calentador indirecto de aire a base de vapor.....	18
10	Calentador directo de aire a base de gas.....	19
11	Quemador de potencia a gas – Tipo pistola.....	20
12	Resistencias eléctricas industriales.....	21
13	Boquilla de un fluido.....	26
14	Diseños de cabezas de boquillas de 2 fluidos.....	26
15	Boquilla en disposición hacia abajo.....	27
16	Boquilla en disposición hacia arriba.....	27
17	Boquillas en disposición de corona.....	28
18	Disco de atomización.....	29
19	Mecanismos de colección de partículas en un ciclón.....	30
20	Principio de funcionamiento de un ciclón.....	31
21	Etapas del secado por aspersión.....	34
22	Proceso psicrométrico del secadero por aspersión.....	37
23	Selección de discos rotatorios.....	43
24	Eficiencia de ciclones en función del tamaño de las partículas.....	44
25	Dimensiones del ciclón.....	45
26	Diagrama de flujo para el dimensionamiento de la cámara.....	47
27	Balance de masa y energía sobre la cámara de secado.....	48
28	Forma y tamaño de la gota atomizada y deshidratada.....	57
29	Dimensiones de la cámara de secado.....	68

30	Proceso de calentamiento sensible.....	71
31	Curvas de trabajo de Quemadores Baltur.....	72
32	Estructura de la plataforma .NET Framework.....	90
33	Diseñador de interfaces de aplicaciones en Visual Studio.....	91
34	Formulario general de ingreso de datos.....	92
35	Formulario de ingreso de datos de la localidad.....	92
36	Formulario de ingreso de datos del producto a secar.....	94
37	Formulario de ingreso de datos del atomizador.....	95
38	Formulario de dimensionamiento de equipos.....	96
39	Entrada de datos ventilador principal y calefactor.....	97
40	Características del ventilador principal y calefactor.....	98
41	Entrada de datos de la bomba de alimentación.....	99
42	Características de la bomba de alimentación.....	100
43	Dimensionamiento del ciclón.....	101
44	Entrada de datos ventilador de extracción.....	102
45	Características del ventilador de extracción.....	103
46	Diseñador de informes de Crystal Reports.....	104
47	Contrato de licencia de .NET 4.0 y SQL Sever 2008.....	107
48	Instalación de .NET Framework 4.0.....	107
49	Instalación de SQL Server 2008.....	108
50	Instalación del software SprayDryer.....	108
51	Directorio de instalación del software SprayDryer.....	109
52	Instalación completada del software SprayDryer.....	109
53	Formulario de ingreso de costos.....	110

LISTA DE ABREVIACIONES

INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
SMACNA	Asociación Nacional de Constructores de Ductos y Aire Acondicionado (Sheet Metal and Air Conditioning Contractors National Association)
ASHRAE	Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers)
HVAC	Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (Heating, Ventilation, and Air Conditioning)
DIN	Deutsche Industrie Norm (Norma Industrial Alemana).
CLR	Entorno de Ejecución Común (Common Language Runtime)
SQL	Lenguaje de Consulta Estructurado (Structured Query Language)

LISTA DE ANEXOS

- A** Temperaturas de entrada y salida de la cámara de secado de diferentes productos.
- B** Propiedades térmicas de líquidos y gases
- C** Conductividad térmica del aire a diferentes temperaturas
- D** Espesores de tubería de acero comerciales cédula 40.
- E** Rugosidad relativa de los materiales de las tuberías y factor de fricción para flujo en régimen de turbulencia total.
- F** Coeficientes de resistencia de accesorios en tuberías comerciales
- G** Factores de corrección por viscosidad
- H** Coeficientes de pérdidas de accesorios de distribución de aire
- I** Factores de corrección por altitud
- J** Subrutina para el dimensionamiento de la cámara de secado.
- K** Subrutina para el dimensionamiento del ventilador principal y el calefactor
- L** Subrutina para el dimensionamiento de la bomba de alimentación
- M** Subrutina para el dimensionamiento del ciclón
- N** Subrutina para el dimensionamiento del ventilador de extracción
- O** Características de secaderos por aspersión marca SACMI
- P** Reporte generado en el software SprayDryer para procesar 4740 kg/h de pasta cerámica
- Q** Selección del ventilador principal
- R** Selección del quemador
- S** Selección de la bomba de alimentación
- T** Selección del ventilador de extracción

RESUMEN

La tesis titulada “Estandarización del Diseño de Secaderos por Aspersión de Materiales Pastosos” se realizó con el fin de dotar a la industria un software que permita el óptimo diseño de éste tipo de secaderos porque tienen gran importancia en la manufactura de cerámicas, productos farmacéuticos, alimenticios, etc. puesto que puede ser aplicado a materiales termolábiles, además permite obtener productos con características específicas de humedad, densidad, tamaño, entre otras.

El desarrollo del software se llevó a cabo en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Se establece una secuencia de cálculo para el dimensionamiento de la cámara de secado y la selección de los equipos necesarios tales como el ventilador principal, de extracción, calefactor y bomba de alimentación, además del diseño de un ciclón de alta eficiencia tipo Stairmand para la separación de polvos. Los parámetros de evaluación que se utilizaron fueron: similitud con secaderos reales, optimizando el diseño para evitar fugas energéticas garantizando la eficiencia del sistema.

La investigación proporciono los siguientes resultados: Un software para la estandarización del diseño de secaderos por aspersión de materiales pastosos, los valores se compararon con un secadero comercial marca SACMI modelo ATM 12 obteniendo un error menor al 10%. Se puede concluir que el software proporciona las dimensiones correctas para el diseño de la cámara de secado y los parámetros para la selección de todos los equipos requeridos teniendo un ahorro tanto económico como energético.

Por lo tanto se recomienda su aplicación en el campo alimenticio, químico e industrial para el proceso de secado por aspersión.

ABSTRACT

The thesis titled “Standardization of Dryers Design for the Paste Materials Aspersión” was carried out to provide the industry a software permitting the optimum design of this type of dryers because they have a great importance in the manufacturing of ceramics, pharmaceutical products, food, etc., as it can be applied to thermal-labile materials, moreover it permits to obtain products with specific characteristics of humidify, density and size among others.

The software development was carried out at the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. A calculus sequence is established for the dimensioning of the drying chamber and the selection of the necessary equipment such as the extraction principal fan, heater and feeding pump as well as the type Stairmand high efficiency cyclone for the dust separation. The evaluation parameters used were: similarity to the real dryers, optimizing the design to avoid energy leaks guaranteeing the system efficiency.

The investigation provided the following results: a software for the standardization of the design of aspersión dryers of paste materials, the values were compared to a SACMi model ATM 12 commercial brand dryer obtaining an error less than 10%. It is possible to conclude that the software provides the correct dimensions for the drying chamber design and the parameters for the selection of all the required equipment having an economic and energetic saving.

Therefore, its application in the alimentary chemical and industrial field for the aspersión drying process is recommended.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El secado por aspersión, pulverización o "spray drying" se utiliza desde principios del siglo 20. Aunque existen patentes para el secado de huevos y leche desde 1850, la atomización industrial de alimentos apareció en 1913 en un proceso desarrollado para leche por Grey y Jensen en 1913. El primer equipo rotativo lo desarrolló el alemán Kraus (1912) pero, comercialmente se conoció gracias al danés Nyro (1933).

El principio de este sistema es la obtención de un producto en polvo a partir de un material líquido concentrado que se pulveriza finamente formando una niebla que entra en contacto con una corriente de aire caliente, entre 200 y 300°C para alimentos, que actúa como medio calefactor y fluido de transporte.

En estos sistemas la transformación tiene lugar mediante una única operación de una alimentación líquida, la misma que puede ser una solución, suspensión o emulsión en un producto seco en polvo, por éste método de secado se puede deshidratar cualquier sustancia que se presente en forma de pasta y pueda ser bombeada como pasta cerámica, frutas y polímeros entre otros.

Con el desarrollo de éste proyecto de grado se pretende mejorar las condiciones de la pasta seca, con la finalidad de mejorar el rendimiento del proceso de secado además de disminuir el consumo de los recursos energéticos por medio del desarrollo de un software que determine las dimensiones de la cámara de secado, y las características de los equipos auxiliares necesarias para la selección de los mismo.

1.2 Justificación técnico-económica

El coste energético del proceso de secado es muy elevado, pero se consigue aumentar la rentabilidad, aumentando el rendimiento de los equipos, como el quemador y las bombas de alimentación, con un control y monitoreo constante de todas las variables que intervienen en el proceso con la finalidad que se encuentren funcionando en su valor óptimo de operación.

El proceso de secado por atomización, debe permitir una producción continua de la pasta de alimentación con las condiciones de humedad y tamaño de grano ideales para el proceso posterior, por lo que se ve la necesidad de diseñar al atomizador en condiciones de máxima eficiencia.

Para lograr el máximo rendimiento en el atomizador se realizará un análisis de los equipos que intervienen en el proceso y se establecerá las condiciones óptimas de operación por medio de un software que determinará los valores de las variables en función a las condiciones iniciales de la solución que va a ingresar al sistema, además se realizará un estudio para determinar las dimensiones de la cámara de secado con el objetivo de disminuir el costo de operación del proceso de secado y en general haciendo un uso eficiente de la energía.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

Estandarizar el diseño de secaderos por aspersión de materiales pastosos.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Describir los procesos de secado por aspersión.
- Determinar las condiciones requeridas para el proceso de secado por aspersión de un producto con determinadas especificaciones.

- Establecer una secuencia de cálculo para determinar el dimensionamiento de la cámara de secado de pasta cerámica con determinadas especificaciones.
- Dimensionar y seleccionar los equipos auxiliares.
- Diseñar de un software para la estandarización de secaderos por aspersión.
- Realizar un análisis de costos.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE SECADO POR ASPERSIÓN.

2.1 Secado

El secado es la operación unitaria en la cual el contenido de humedad del material es eliminado hasta alcanzar la humedad de equilibrio mediante evaporación como resultado de la aplicación de calor bajo condiciones controladas [1].

La conservación de productos de tipo biológico se debe a que la actividad acuosa se reduce a un nivel donde no se presenta actividad microbiológica y tanto el deterioro químico como las reacciones bioquímicas se reducen al mínimo [1].

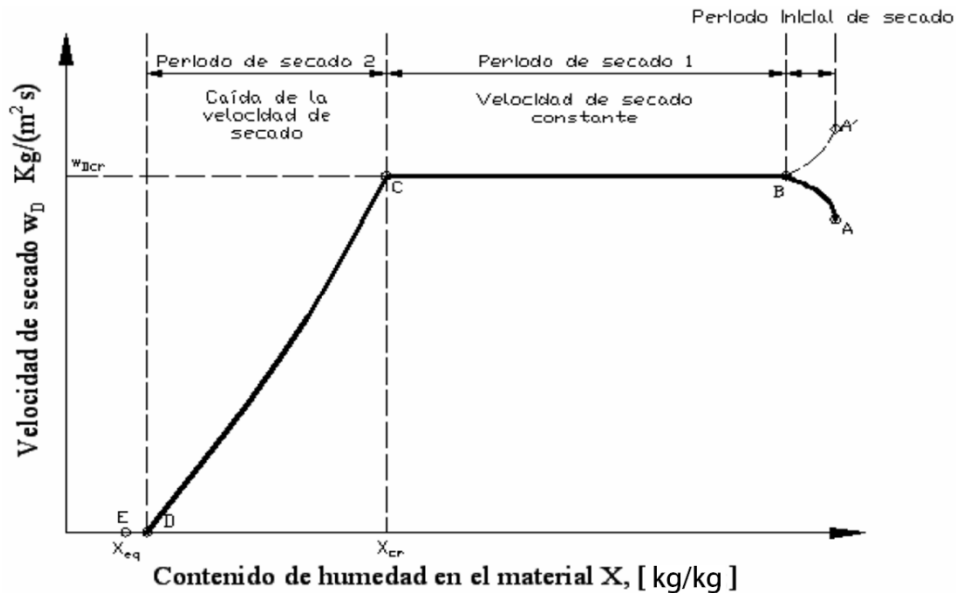
La reducción de la actividad acuosa se logra a través de la aplicación de calor al producto. En esta operación se involucra transferencia de calor y masa produciendo transformaciones físicas y químicas. Estos cambios pueden ser de tipo físico como: encogimiento, inflado, cristalización; o bien pueden ocurrir reacciones químicas o bioquímicas deseables o indeseables con cambios de color, textura, olor y otras propiedades del producto sólido.

2.1.1 Características de un proceso de secado. Cuando unas partículas contienen humedad y la humedad sobre pasa el 30%, esto quiere decir que la humedad ha llenado completamente todos los micro y macro capilares, la humedad excede el espacio de los capilares y forma una capa delgada de agua sobre la superficie de la partícula.

Cuando comienza el secado y el contenido de humedad es mayor que el contenido de humedad higroscópico. La velocidad de secado es casi constante debido a que la intensidad del secado es igual a la intensidad de evaporación de la superficie libre del líquido.

Si el contenido de humedad es menor que el higroscópico, la velocidad de secado decrece, principalmente debido a la retención de la superficie de evaporación (control de la región de difusión interna).

Figura 1. Curva de velocidad de secado



Fuente: Elaboración propia

Hay que tomar en cuenta que el efecto de enfriamiento por evaporación cesa y la temperatura de la superficie del material empieza a incrementarse gradualmente casi hasta la temperatura del agente de secado.

2.1.2 Criterios para la selección del método de secado. Hay que tomar en cuenta diversos criterios para escoger el método que mejor se adapte al secado de una sustancia [2]:

- El modo de funcionamiento del aparato
- La naturaleza y calidad del producto a secar
- La fuente de calor y el modo de transmisión del mismo
- La seguridad
- El consumo de energía
- La facilidad para controlar el tiempo de tratamiento

La elección del método de secado es generalmente una situación ponderada de todos estos factores.

Modo de funcionamiento del aparato. El funcionamiento puede ser discontinuo o continuo.

La selección depende de la importancia de la producción. Si ésta es pequeña, a menudo se escoge un funcionamiento discontinuo. Si al contrario, la producción es importante, las operaciones de carga o descarga a efectuar en discontinuo se volverían más tediosas. Por lo tanto, el funcionamiento continuo es deseable y económicamente más rentable [2].

Naturaleza del producto a secar. La preparación, modo de manejo, fuente de calor a utilizar, modo de transmisión y concepción de los sistemas de aireación, dependen de la naturaleza del producto a secar. Puede tratarse de líquidos, pastas, materiales pulverizados, granulados, fibrosos o compactos [2]:

- Los cuerpos pastosos muy viscosos frecuentemente se laminan sobre tambores y después se desmenuzan, lo cual les confiere una textura cercana a la de los sólidos. También pueden ser tratados sobre bandas o en secadores de tornillo.
- Los sólidos pulverulentos (o susceptibles a ser triturados) son secados generalmente en secadores de banda, cilindro, lecho fluido, lecho móvil, transporte neumático. Si son susceptibles a aglutinación se puede diseñar una recirculación de producto seco para reducir los riesgos de aglomeración (bajo reserva de que el aumento en el tiempo de residencia puede contribuir a una degradación de los productos).
- Los productos compactos o en trozos son tratados en secadores de gabinete, en túneles de carros o banda transportadora.

- Un producto bombeable ofrece más posibilidades de tratamiento que uno no bombeable.

La cantidad de producto a obtener puede limitar la elección del modo de secado. Así, por ejemplo, el secado de colorantes, de productos farmacéuticos o alimenticios, debe llevarse a cabo evitando toda contaminación del producto o el someterlos a atmósferas que los puedan degradar; por ello muchos de estos productos se secan en pequeños lotes.

Fuente de calor y modo de transmisión. En los secadores de convección o conducción, pueden utilizarse los fluidos calientes clásicos (vapor, agua caliente, gas de combustión) para suplir el calor necesario para la extracción de humedad. Estos fluidos circulan generalmente por chaquetas o por tubos en contacto con el material a secar (secado por conducción) o dentro de los calentadores de aire (secado por convección). Si los gases de combustión están limpios, se les puede poner en contacto directo con el material a secar. El secado por irradiación infrarroja se efectúa por medio de lámparas eléctricas o de paneles calefactores. El secado por corrientes de alta frecuencia se utiliza sobre todo cuando la calidad del producto seco es determinante [2].

La elección de la temperatura de secado es muy delicada:

- Una elevada temperatura permite aumentar la velocidad de secado, pero conduce a veces a la aparición de una costra en la superficie del producto, fenómeno que dificulta la extracción de humedad.
- Una temperatura demasiado baja aumenta considerablemente el tiempo de operación.
- Algunos productos son termosensibles y no pueden ser secados a temperaturas superiores a 60°C, por ejemplo. Como ya se ha mencionado, la convección es el método de transferencia más utilizado en el secado [3].

El contacto entre el gas y el producto puede hacerse:

- Por secado simple: el aire circula a lo largo de la superficie del producto que está dispuesto en capas delgadas sobre las charolas, los carros o las bandas transportadoras. Esta técnica es conveniente para el secado de productos pulverulentos, granulosos o compactos. El tiempo de residencia en el aparato puede ser fácilmente controlado.
- Por combinación de dispersión y raspado en los secadores de tambor. Esta técnica está bien adaptada para sólidos granulosos. En general, el tiempo de residencia del producto en el secador es largo.
- Por circulación del aire a través del material. Este tipo de contacto mejora considerablemente la transferencia de calor y de material, pero la pérdida de carga que sufre el gas es importante. Esta técnica es utilizada para el secado de todo tipo de sólidos [1].

El tiempo de residencia de los productos es variable. El secado por conducción se emplea sobre todo para el tratamiento de líquidos, productos pastosos o sólidos que no pueden ser puestos en contacto con el aire [4].

Seguridad del proceso. Conviene no perder de vista que el secado de algunos productos puede llevar a la formación de polvo en las zonas secas, esto es, a la salida del secador o de los ciclones, lo que puede provocar problemas de contaminación. Además, algunos productos que conlleven emanaciones tóxicas deben ser tratados por métodos especiales [2].

Consumo de energía. La eficiencia energética de los secadores térmicos es baja. En efecto, debemos recordar que el objetivo del secado es de arrastrar y eliminar un líquido de un producto al cual está inicialmente ligado por uniones de tipo químico (iónicas, covalentes, metálicas) o de tipo electrostático (enlaces de Van der Waals, puentes de hidrógeno), uniones que requieren un gran consumo de energía para ser rotas. El rendimiento de los secadores pocas veces sobrepasa el 60%. Es importante entonces, incluir técnicas susceptibles para economizar energía (5).

2.1.3 *Parámetros a considerar en el proceso de secado.* Los parámetros que influyen en la tasa de secado, cuando se secan materiales con aire forzado, son: la temperatura y la humedad relativa del ambiente, la temperatura y el flujo de aire de secado, el contenido de humedad inicial y de equilibrio de los materiales, la temperatura y, dado el caso, la velocidad de dichos materiales dentro del secador.

Los parámetros de secado citados no son independientes. Esto quiere decir que influyen en la tasa de secado como un conjunto de factores y no aisladamente. El manejo adecuado de dichos parámetros permite determinar el equipamiento apropiado para las condiciones específicas de secado.

Condiciones del aire ambiente

A la temperatura y la humedad relativa del aire ambiente, muchas veces no se les da importancia para el secado a altas temperaturas. Estos parámetros tienen poca influencia sobre la tasa de secado; en cambio, determinan la cantidad de energía necesaria para alcanzar la temperatura de secado. Cuanto menor sea la temperatura ambiente, mayor será la cantidad de energía necesaria para calentar ese aire, lo que determina un mayor costo del secado.

Temperatura de secado

La temperatura del aire de secado es el parámetro de mayor flexibilidad en un sistema de secado a altas temperaturas e influye significativamente en la tasa y la eficiencia de secado y en la calidad del producto final. Un aumento de dicha temperatura significa un menor consumo de energía por unidad de agua evaporada y una mayor tasa de secado. En cambio, las temperaturas de secado más elevadas pueden causar daños térmicos más acentuados en los granos. La temperatura de secado, junto con los flujos de aire y de granos, determina la cantidad de agua evaporada en un secador.

Presión estática y flujo de aire

La pérdida de carga de un flujo de aire a través de una capa de granos, conocida generalmente como resistencia al flujo de aire y denominada presión estática, influye en este flujo y, en consecuencia, en la tasa de secado.

Dicha resistencia determina la exigencia de mayores presiones estáticas para el ventilador y, en consecuencia, en la reducción de la masa de aire que éste proporciona.

Humedad inicial del producto

El contenido de humedad inicial también influye en la tasa de secado. Cuanto más elevado sea el contenido de humedad de un producto, mayor será la cantidad de agua evaporada por unidad de energía. Con elevados contenidos de humedad, las fuerzas de adsorción de la estructura celular del material sobre las moléculas de agua, son menores que cuando el contenido de humedad del producto es más bajo. En consecuencia, se utiliza un mayor porcentaje de energía disponible para evaporar la humedad contenida en los granos más secos.

Flujo del producto dentro del secador

La velocidad con que el material pasa por el secador, denominada con mayor frecuencia flujo de masa o tiempo de residencia del producto en el secador, puede influir en la tasa de secado, la eficiencia del proceso y la calidad final del producto. Si el flujo de masa aumenta, el producto final será, en general, de mejor calidad. Por otra parte, hay un aumento del consumo de energía específica, esto es, de la energía que se necesita para evaporar una unidad de masa de agua y una disminución de la eficiencia térmica del secado, porque los granos que pasan por el secador con mayor velocidad pierden menos humedad y el secado puede resultar insuficiente. El manejo adecuado de la velocidad del producto tiene importancia fundamental en el secado.

2.2 Proceso de secado por atomización

El secado por aspersión también llamado atomización, rocío o *spray* es ampliamente utilizada en la industria procesadora de alimentos, polímeros, cerámicas, etc. Consiste en la transformación de una materia en forma líquida en forma seca se logra mediante la generación de gotas minúsculas que poseen una gran área superficial para la evaporación de su humedad, el medio secante suele ser un gas caliente en gran volumen; con la suficiente energía para completar la evaporación del líquido [6].

Figura 2. Secadero por aspersión industrial



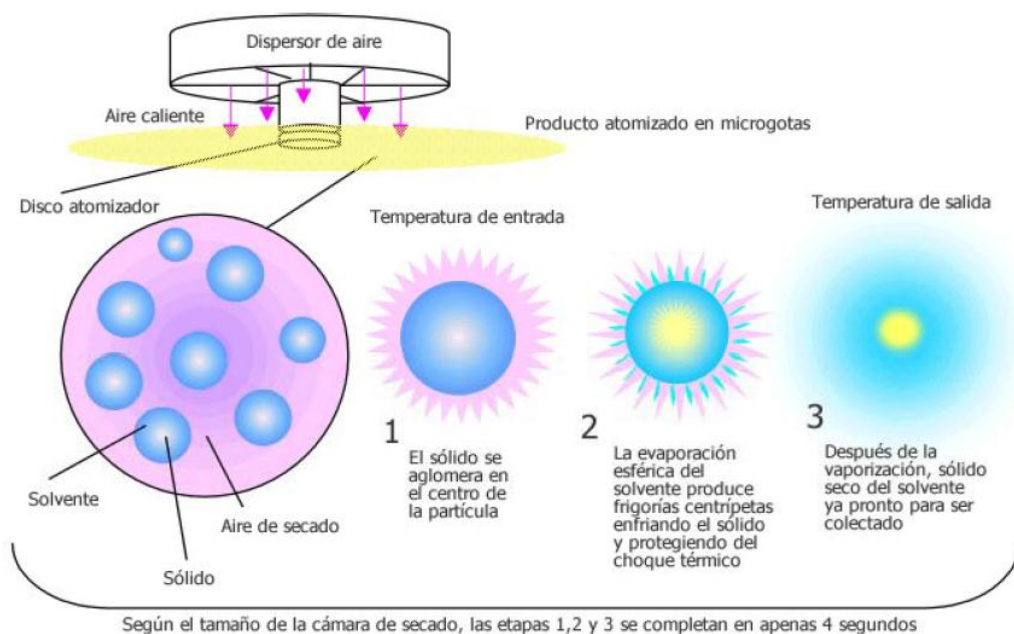
Fuente: <http://www.niro.com/niro/cmsdoc.nsf/webdoc/ndkw5zyc4b>

El secado por aspersión es la operación unitaria en la que se transforma un producto o alimentación desde un estado líquido hasta un estado en forma pulverizado. Es un proceso prácticamente instantáneo de producir un sólido seco a partir de una alimentación fluida, siendo el aire caliente el medio que suministra el calor necesario para la evaporación y al mismo tiempo el acarreador del agua eliminada.

2.2.1 Secuencia del proceso de secado por atomización. Cualquiera sea el sistema y el proceso la aspersión experimenta tres fases distintas: en la primera el gas atomizante se expande adiabáticamente de la boquilla a la cámara de secado (atmósfera), el gas sufre el efecto Joule-Thomson y su temperatura cae. En la segunda el líquido forma gotas, durante la aspersión el área superficial específica se incrementa mil veces. Teóricamente se requiere poca energía para formar las gotas. Sin embargo, la ineficiencia mecánica, la presión y la inercia además de la pérdida por viscosidad causan un elevado consumo de energía [6].

En la tercera etapa viajan estando formadas para convertirse en materia seca, durante esta fase el solvente se evapora y el diámetro de la gota decrece. La primera fase ocurre instantáneamente, la segunda dura larga, calmadamente y firme (cerca de 0.1 s o menos), la tercera puede sostener un tiempo relativamente grande dependiendo de las condiciones de la aspersión, el líquido disperso y la saturación relativa del aire ambiente [6].

Figura 3. Mecanismo de secado



Fuente: Secado por aspersión, Universidad del Tolima Colombia, pág. 12

El secado es controlado por medio del producto y las condiciones del aire a la entrada (flujo y temperatura). Finalmente, el producto es recuperado del aire.

El secador por aspersión más común es el de ciclo abierto, este sistema tiene entrada continua de aire que es calentado y usado como medio secante, limpiado por medio de ciclones o agotadores y luego liberado al ambiente. Un segundo tipo es el de ciclo cerrado, donde el aire es calentado, usado como agente secante, limpiado, secado y de nuevo usado.

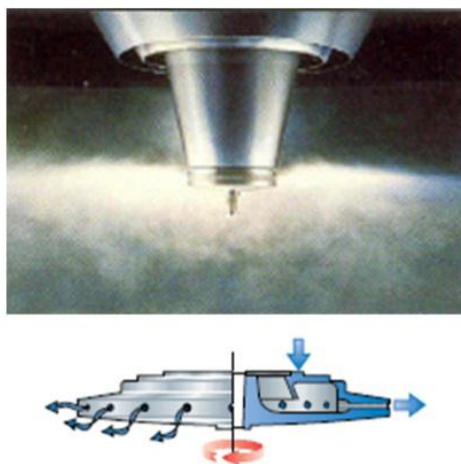
2.2.2 Tipos de secaderos por aspersión. La clase de atomizador a utilizar también es un parámetro que puede influir en el secado por aspersión debido a que este define como, con qué velocidad y en qué cantidad entra la alimentación a la cámara de secado.

Existen diferentes clasificaciones de los secaderos por aspersión según el criterio por los que se clasifiquen:

Según el medio atomizante:

Atomizador centrífugo: Consiste en un disco que gira al extremo de un eje. Existen cabezas atomizadoras de diferente tamaño, desde discos de 5 cm que giran a 50.000 rpm a ruedas de 76 cm que giran a 3.450 rpm. Pueden producir partículas muy finas pero también gruesas, trabajar con líquidos viscosos y a velocidades lentas.

Figura 4. Atomizador centrífugo



Fuente: <http://www.hydrosol.de/centro-tecnico-de-pulverizacion.html>

Atomizador a presión: El líquido se bombea a presión alta a través de un orificio pequeño formando una niebla de líquido en forma de cono hueco.

Figura 5. Atomizador a presión



Fuente: <http://www.process-heating.com/Articles/> page=4

Atomizador neumático: Utiliza una alta velocidad del gas que permite crear fuerzas de fricción elevada que causa la rotura del líquido en gotas. Este mecanismo usa como medio gaseoso aire y vapor.

Figura 6. Atomizador neumático



Fuente: <http://www.process-heating.com/Articles/> page=5

Según el contacto aire-gota:

Existen tres formas básicas de contacto aire-gota:

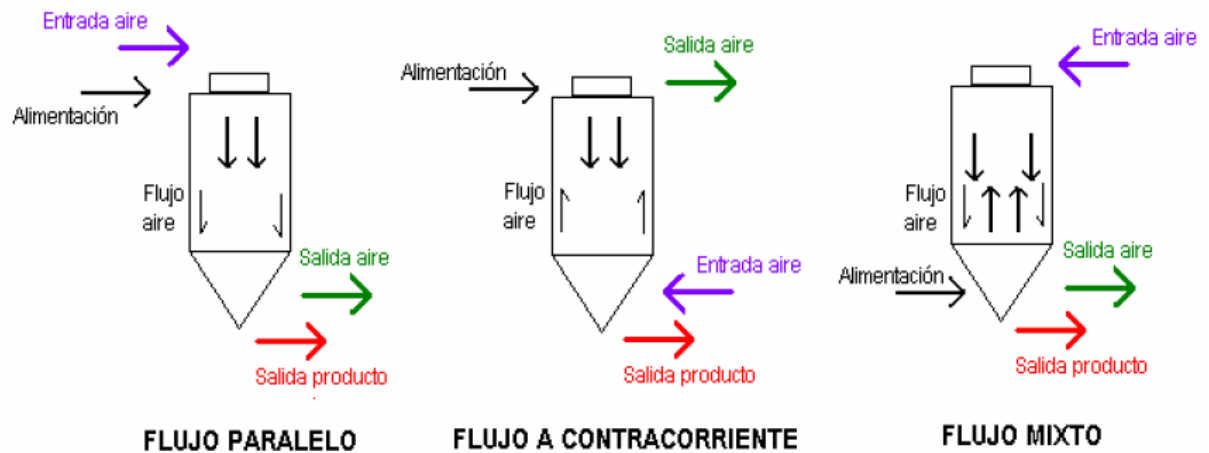
Flujo paralelo: El asperjado y el aire caliente se introducen en la zona superior de la cámara y viajan en la misma dirección a través del secador (Fig. 7). El aire caliente contacta inicialmente a las gotas atomizadas.

Esto favorece a los materiales termolábiles, ya que éstos son protegidos de las altas temperaturas por enfriamiento evaporativo. El gas de secado se va enfriando al pasar a través de la cámara y las partículas secas se encuentran con aire más frío a la salida del equipo. Cuando se utiliza un atomizador rotatorio se presenta un perfil homogéneo de temperaturas dentro de la cámara de secado.

Flujo a contracorriente: El aire de secado y el asperjado se mueven en direcciones opuestas en la cámara de secado (Fig. 7). Debido a que las partículas secas se ponen en contacto con el gas más caliente y el tiempo de exposición es mayor, el diseño se propone para productos no termolábiles. En estos casos, el producto seco sale a una temperatura tan alta como la del gas de secado. Este arreglo se utiliza cuando se quiere impartir ciertas cualidades al producto, como por ejemplo, una alta densidad a granel para el caso de detergentes.

Flujo mixto: Una boquilla se coloca en el fondo de la cámara, dirigida hacia arriba, dentro de la corriente descendente del gas, cuya entrada se encuentra en el techo de la cámara (Fig. 7). Este arreglo no se recomienda para productos termolábiles ya que las partículas secas están en contacto con el aire más caliente, sin embargo se recomienda para partículas gruesas en cámaras pequeñas, ya que la longitud del patrón de viaje de las partículas es grande. Se ha observado que estas partículas pueden presentar movimiento dentro de la cámara tanto del tipo paralelo como en contracorriente.

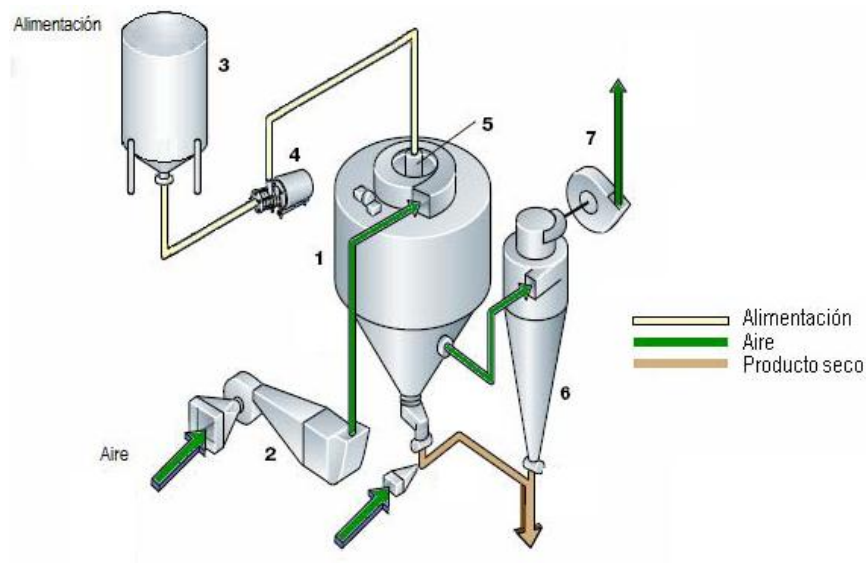
Figura 7. Tipos de contacto aire-gota



Fuente: Elaboración propia

2.2.3 Componentes del secadero por aspersión. En la siguiente figura se muestran los componentes de un secadero por aspersión:

Figura 8. Componentes de un secadero por aspersión



Fuente: Tecnología de la Leche en Polvo y Secado por Atomización, NIRO, pág. 68

Dónde:

1.- Cámara de secado: Es dónde se produce el contacto entre la gota y el aire caliente, debe tener el tamaño requerido para que el tiempo de residencia de las gotas sea el requerido para el secado.

2.- Sistema de calentamiento: El mismo consta de un ventilador para impulsar el aire y un quemador o un conjunto de resistencias eléctricas que se encargan de elevar la temperatura del aire a la requerida.

3.- Tanque de alimentación: En el cuál se almacena la pasta líquida de los productos a secar.

4.- Bomba de alimentación: Debe ser capaz de bombear el líquido hasta el atomizador con el caudal requerido en el proceso.

5.- Atomizador: Se encarga pulverizar el producto generando gotas para mejorar el proceso de evaporación.

6.- Separador ciclónico: Debe separar el producto seco del aire que se expulsa a la atmósfera.

7.- Ventilador de descarga de aire y filtro: En la etapa final el aire pasar por un filtro para eliminar todas las partículas del sólido seco y evacuar el aire.

2.2.4 *Variables que intervienen en el proceso de secado por aspersión.* Las variables de diseño se deben establecer por medio de pruebas experimentales antes de efectuar el diseño final de una cámara. En general, el tamaño de la cámara, la selección del atomizador y los medios auxiliares de separación se determinan de acuerdo con las características físicas del producto que se busquen. Un secador de rocío instalado es más o menos inflexible para satisfacer los requisitos variables de operación al mismo tiempo que mantiene una velocidad de producción constante.

Entre las variables más sobresalientes que se deben precisar antes de diseñar un secador están las siguientes [4]:

1. La forma y tamaño de las partículas que se buscan en ese producto.
2. Las propiedades físicas de la alimentación: humedad, viscosidad, densidad.
3. Las temperaturas máximas del gas de entrada y el producto.

2.3 Generación de aire caliente

El aire de secado puede ser calentado de diferentes formas:

- Indirecto: Vapor / Fuel / Gas / Fluido térmico.
- Directo: Gas / Electricidad

Calentamiento indirecto

Un calentador a vapor es un simple radiador. La temperatura que se puede obtener depende de la presión de vapor disponible. En condiciones normales es posible obtener una temperatura del aire 10°C más baja que la correspondiente entalpía de saturación del vapor.

La eficiencia de los calentadores de aire a base de vapor es normalmente de 98 - 99%. Como la caldera a vapor está casi siempre colocada a cierta distancia del calentador de aire, se debe calcular con 2-3 bar g de presión extra en la caldera debido a la caída de presión en el tubo de vapor y por la válvula reguladora.

Figura 9. Calentador indirecto de aire a base de vapor



Fuente: Tecnología de la Leche en Polvo y Secado por Atomización, NIRO, pág. 74

Los calentadores indirectos a fuel o gas tienen flujos separados de aire de secado y gases de combustión. Los gases de combustión pasan sobre o a través de tubos que actúan como una superficie de transferencia de calor para el aire de secado. La cámara de combustión está construida de acero resistente al calor. La tapa final del calentador debe ser desmontable para limpiar los tubos.

Los calentadores de aire a fluido térmico se usan solos, o cuando se requieren altas temperaturas de entrada del aire y la presión de vapor no es suficientemente alta. El sistema consiste en un calentador, a gas o fuel, y un intercambiador de calor. Entre estos dos componentes circula a alta velocidad un aceite especial o un fluido de transferencia térmica que no se descomponga a altas temperaturas. La mayor ventaja de este tipo de calentador es su sistema abierto sin presión.

Calentamiento directo

Los calentadores directos a base de gas se utilizan solamente si se puede permitir que el gas de combustión esté en contacto con el producto. Por esta razón no se usan mucho en la industria láctea y alimenticia. El calentador directo a gas es barato, tiene una alta eficiencia y la temperatura que se puede obtener es de unos 2000°C.

Figura 10. Calentador directo de aire a base de gas



Fuente: Tecnología de la Leche en Polvo y Secado por Atomización, NIRO, pág. 76

Los calentadores de aire eléctricos son comunes en secadores para laboratorios y plantas piloto. La inversión es baja, pero su operación costosa y por este motivo no se usan en plantas industriales.

2.3.1 Quemadores. Un quemador es un dispositivo para quemar combustible líquido, gaseoso o ambos (excepcionalmente también sólido) y producir calor generalmente mediante una llama.

Son aquellos dispositivos que están diseñados para entregar un tiro forzado de llama, la que se direcciona horizontalmente, dentro de sus componentes podemos citar al ventilador circular interno el cual se encarga de crear turbulencia para mezclar el aire y el combustible. El tipo de ignición que este tipo de quemadores utiliza puede efectuarse mediante un piloto permanente, intermitente o directamente por chispa. Entiéndase a piloto como una llama pequeña que se mantiene encendida de forma continua o intermitente mediante pulsaciones de encendido del piloto que van de 60 a 80 veces por segundo, cuando el gas principal entra a la cámara de combustión, la llama del piloto enciende el quemador. En sí es un dispositivo muy complejo, actualmente incluyen programas junto a un sistema interno de control compuesto de sensores especializados que le permiten mejorar la combustión automáticamente.

Figura 11. Quemador de potencia a gas – Tipo pistola



Fuente: <http://www.circalefaccion.com/index.php>

2.3.2 Resistencias eléctricas. En un intercambiador de calor eléctrico, la clave es mantener el equipo en condiciones tales que la temperatura en el interior no exceda la temperatura de la envoltura protectora de la unidad generadora de calor y mantenerse el flujo, nunca debe detenerse ya que la temperatura se incrementa exponencialmente cuando la velocidad de flujo del proceso decrece. Si el flujo se detuviese entraría a actuar el sistema de enfriamiento

Figura 12. Resistencias eléctricas industriales



Fuente: <http://www.resistencias-electricas.com/aree-di-sviluppo/textil>

2.4 Sistema de alimentación de pasta

Los fluidos se mueven a través de tuberías por medio de bombas. Estos dispositivos aumentan la energía mecánica del fluido, el aumento de energía puede emplearse para incrementar su velocidad, presión o la altura del fluido. En las bombas la densidad del fluido no varía significativamente [5]:

Los sistemas de alimentación comúnmente constan de los siguientes elementos:

Tanques de alimentación

Se recomienda utilizar dos tanques de alimentación y cambiar de uno a otro por lo menos una vez cada 4 horas. Esto se debe al riesgo de desarrollo de bacterias en la alimentación, que en condiciones normales tiene una temperatura de

45-50°C. Mientras uno está en uso el otro está siendo lavado. El tamaño de los tanques debe corresponder a unos 15-30 minutos de capacidad de producción del secador. Los tanques tienen indicadores de nivel y toberas de rocío para una limpieza CIP automática

Tanque de agua

El tanque de agua se usa durante el arranque y parada de la planta, o si durante la operación hay una súbita falta de concentrado. Alternativamente se pueden instalar controladores del nivel en los tanques de alimentación y un tubo de suministro de agua conectado al tanque, en cuyo caso se evita el tanque de agua.

Bomba de concentrado

Si se usa un atomizador rotativo la bomba de concentrado más común es el tipo mono o el tipo centrífugo. La bomba mono necesita menos energía y puede manejar concentrados a más altas velocidades que la bomba centrífuga, pero es más cara.

Sistema de precalentamiento

La atomización por toberas requiere una temperatura del producto en alimentación más alta (viscosidad más baja) que la proveniente de los tanques. No obstante, de un punto de vista de atomización, el precalentamiento es ventajoso, también para atomización rotativa. Por eso se recomienda un pre calentador del concentrado.

2.4.1 Tipos de bombas. Las bombas que usualmente se utilizan en sistemas de alimentación se mencionan a continuación:

Bombas de fuelle. Estas bombas mueven el fluido a través de un fuelle reciprocante con cavidades, que está acoplado a un varilla conductora. Ellas se encuentran clasificadas dentro de las bombas de desplazamiento positivo.

Bomba centrífuga. Un disco rotatorio con alabes adheridos conducen el fluido por medio de un eje central. Son tal vez las más simples y más versátiles de las bombas pequeñas. El fluido entra en la cámara de la bomba a lo largo del eje del rotor. Una vez en la cámara, la rotación acelera el fluido y lo eyecta perpendicularmente al eje del rotor. Tiene rango de aplicación medio, son mecánicamente simples porque la única parte móvil es el rotor de la bomba. Tiene la ventaja de manejar material particulado por otro lado, no son precisas.

Bombas de diafragma. Las pulsaciones de uno o más diafragmas flexibles desplazan el líquido, se emplean cuando se tienen altas presiones, son ideales cuando se requiere manejar fluidos altamente viscosos o fluidos cargados con partículas.

Bomba peristáltica. Usan tubería flexible y un grupo de rodillos externos para impulsar el fluido, el fluido bombeado no entra en contacto con ningún otro. Pueden manejar material cargado con partículas o gas con partículas. El rango de bombear fluidos es casi ilimitado por la gran variedad de materiales que existen para la tubería. Se aplican cuando se requieren condiciones de esterilidad, todos los elastómeros usados en las bombas peristálticas tienen una vida mecánica finita y la ruptura de la tubería es el mayor problema, ya que causa derramamiento.

Bombas de rueda dentada. El fluido es atrapado entre dos o tres ruedas dentadas, son buenas cuando se requieren altas presiones. Para un fluido con determinada viscosidad y densidad el flujo es función del número de revoluciones por minuto de la rueda y la presión anterior.

Bombas de pistón. Genera el movimiento mediante el movimiento de un pistón. Las bombas de pistones son del tipo bombas volumétricas, y se emplean para el movimiento de fluidos a alta presión o fluidos de elevadas viscosidades o densidades. Cada movimiento del pistón desaloja, en cada movimiento un mismo volumen de fluido, que equivale al volumen ocupado por el pistón durante la carrera del mismo.

2.4.2 *Parámetros de funcionamiento de bombas de alimentación.* Para seleccionar una bomba se deben considerar una variedad de parámetros donde la elección correcta es una función de su aplicación y costo. Inicialmente las bombas se pueden dividir en dos: bombas de bajo y alto flujo; las de bajo flujo se aplican en laboratorios, plantas piloto y manejo de aguas residuales.

A continuación se presenta una lista de preguntas para suministrar un recurso de cómo escoger o seleccionar una bomba:

- Cuáles son los requisitos de flujo y presión? Se deben especificar velocidades de flujo, presión a la entrada, presión de retroceso, presión total del sistema.
- Cuál es el fluido a ser bombeado? La compatibilidad química del fluido con los materiales de construcción de la bomba, su viscosidad, temperatura y sensibilidad.
- El fluido contiene material particulado?.
- Cuál es el requisito de precisión?. En general, las bombas de desplazamiento positivo son usadas en aplicaciones de alta exactitud tan ajustadas que pueden ser $\pm 1\%$ el error.
- Cuáles son los requisitos para poder y control?. Un lote de preguntas surgirá en esta categoría.
- Cuáles son los voltajes, frecuencia y fases del poder eléctrico?
- Si la localización es remota, se puede emplear una batería? o un motor a gasolina o simplemente energía eléctrica como fuente de poder?.

Existen 16 tipos de bombas, las cuáles están agrupadas para facilitar su elección. Sin embargo, esto no es suficiente ya que no hay un criterio único para su

elección. Con el fin de ayudar a solucionar este problema, los fabricantes suministran cartas o esquemas tales como árboles de decisión. En tales esquemas, las bombas están dispuestas funcionalmente; por ejemplo cuando se emplean atomizadores rotatorios la bomba de alimentación más común es el de tipo mono o el tipo centrífugo. La bomba mono puede manejar concentrados a más altas velocidades que la bomba centrífuga con menor energía.

Si se emplea un sistema de boquillas a presión se usan bombas de alta presión, esta necesita una presión positiva en la entrada, y por eso requiere además una bomba centrífuga.

2.5 Boquillas de presión

El material a secar es alimentado a la cámara de secado por una boquilla bajo presión. La presión es convertida a energía cinética, y el líquido sale del orificio de la boquilla a una gran velocidad como una fina película que rápidamente se desintegra dando lugar al atomizado. La alimentación se hace rotar dentro de la boquilla resultando un cono que emerge del orificio.

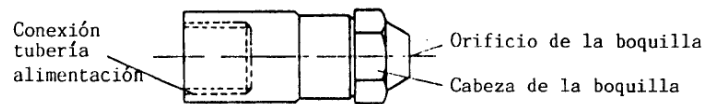
La aspersión producida por las boquillas de presión maneja grandes cantidades de alimentación y son generalmente menos homogéneos y amplios que los atomizados producidos por un atomizador centrífugo.

Estos atomizadores pueden operar con presiones arriba de 680 atm (10 000 psi), son una buena alternativa para manejar alimentaciones con bajo contenido de sólidos (menos del 20%).

2.5.1 Tipos de boquillas. Las boquillas principalmente se clasifican por el número de fluidos que intervienen en el proceso de atomizado, como se muestra a continuación:

Boquillas de un fluido.- La entrada a la boquilla es únicamente la alimentación a atomizar, el funcionamiento de las boquillas es afectado por la presión, densidad y viscosidad del líquido.

Figura 13. Boquilla de un fluido

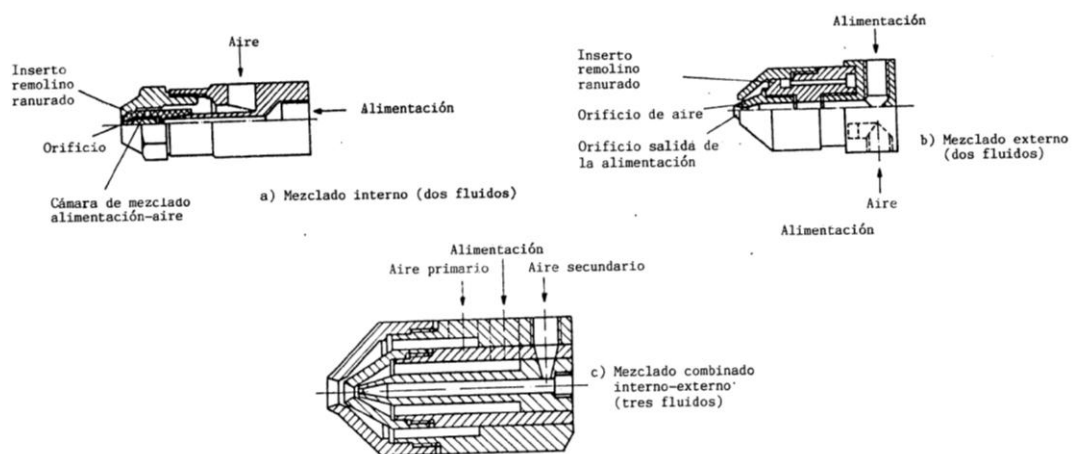


Fuente: Tecnología de la Leche en Polvo y Secado por Atomización, NIRO, pág. 92

Boquillas de dos fluidos.- Estos atomizadores son también llamados boquillas neumáticas, su ingreso consta de la alimentación y de aire, los alimentadores de dos fluidos son usados para flujos de alimentación muy pequeños y para materiales abrasivos o altamente corrosivos.

Su flujo de aire puede controlar el tamaño de partícula aun cuando la corriente de alimentación varíe, en la siguiente figura se muestran varios diseños de cabezas de boquillas de dos fluidos.

Figura 14. Diseños de cabezas de boquillas de 2 fluidos



Fuente: Tecnología de la Leche en Polvo y Secado por Atomización, NIRO, pág. 92

2.5.2 Disposición de boquillas. La ubicación de las boquillas define el tipo de contacto aire-gota a generarse en el secadero, siendo los casos más típicos los siguientes:

Flujo paralelo.- En este caso la cabeza de la boquilla se orienta en la misma dirección que el flujo de aire.

Figura 15. Boquilla en disposición hacia abajo



Fuente: <http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/secadores.html>

Flujo mixto.- El fluido y la cabeza de la boquilla tienen orientaciones opuestas generando así un flujo mixto, lo más común es que la orientación de la boquilla sea hacia arriba.

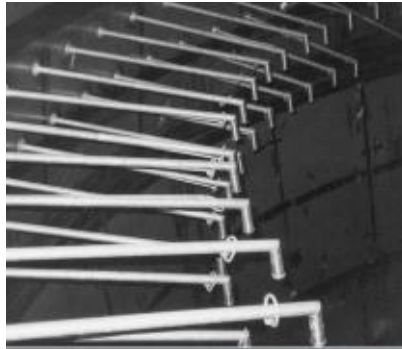
Figura 16. Boquilla en disposición hacia arriba



Fuente: <http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/secadores.html>

En corona.- Cuando el caudal requerido es alto se debe utilizar varias boquillas formando una corona en el interior de la cámara de secado, en este caso el contacto aire-gota puede ser mixto o paralelo dependiendo de la orientación de las cabezas de la boquilla.

Figura 17. Boquillas en disposición de corona



Fuente: <http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/secadores.html>

2.5.3 Capacidad y ángulo de pulverización. La velocidad del flujo es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la presión, y varía inversamente proporcional con la raíz cuadrada de la densidad del líquido, esta relación solamente es una aproximación.

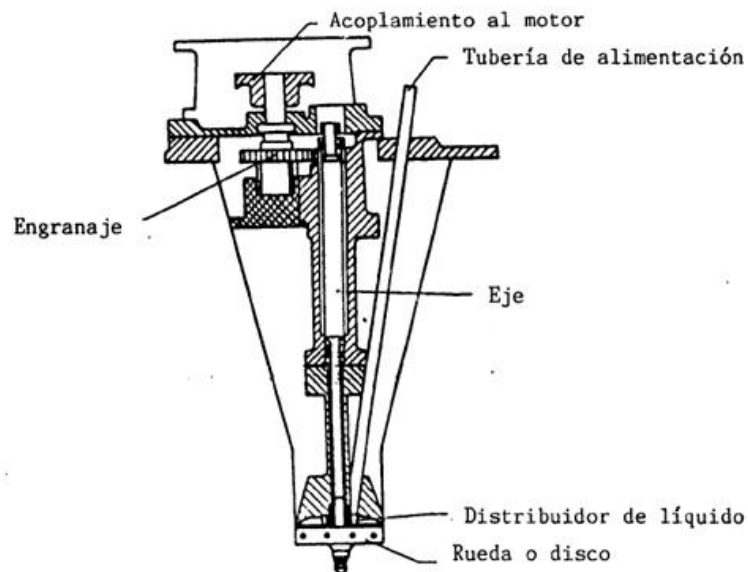
Además una mínima presión es requerida para desarrollar cualquier ángulo de la aspersión. Esta presión mínima es aproximadamente de 1,4 atm (20 psig). El incremento en la presión disminuye el ángulo de la atomización, pero su influencia es despreciable, especialmente si se mide cerca del orificio de la boquilla. A mayores presiones de trabajo arriba de 14 atm (200 psig), el ángulo de la aspersión empieza a reducirse debido al efecto del aire que entra.

La viscosidad tiene un efecto significativo cuando un incremento en la misma produce un ángulo estrecho. Si la viscosidad es muy grande el ángulo del atomizado se reduce significativamente debido al taponamiento de la corriente, dando lugar a que la atomización cese.

2.6 Discos rotatorios

El alimento se introduce centralmente en la boquilla y es llevado hacia las paredes del disco y sale por espacios de diferentes formas como aspas, barras espaciadoras o agujeros. Los de aspas son usados ampliamente y producen *sprays* de alta homogeneidad. Los de agujeros son usados en campos más especializados, por ejemplo en el manejo de productos alimenticios abrasivos pueden ser operados para producir tamaños medios, son resistentes, fáciles de operar y pueden manejar velocidades de flujo fluctuantes. A velocidades superiores a 180 m/s el tamaño promedio de partícula es de 20 a 30 μm , cuando su velocidad disminuye el tamaño aumenta.

Figura 18. Disco de atomización

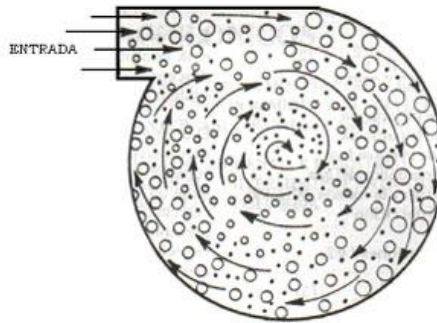


Fuente: Tecnología de la Leche en Polvo y Secado por Atomización, NIRO, pág. 92

2.7 Sistema de recolección de polvo

El equipo de recolección de polvo que se usa con mayor frecuencia es el ciclón. Los ciclones remueven el material particulado de la corriente gaseosa, basándose en el principio de impactación inercial, generado por la fuerza centrífuga. La figura 2.19 muestra el movimiento de las partículas mayores hacia las paredes del ciclón debido a la fuerza centrífuga.

Figura 19. Mecanismos de colección de partículas en un ciclón.



Fuente: Diseño óptimo de ciclones, 2006, pág. 2

El ciclón es esencialmente una cámara de sedimentación en que la aceleración gravitacional se sustituye con la aceleración centrífuga.

Los ciclones constituyen uno de los medios menos costosos de recolección de polvo, tanto desde el punto de vista de operación como de la inversión. Estos son básicamente construcciones simples que no cuentan con partes móviles, lo cual facilita las operaciones de mantenimiento; pueden ser hechos de una amplia gama de materiales y pueden ser diseñados para altas temperaturas y presiones de operación.

Los ciclones son adecuados para separar partículas con diámetros mayores de $5\ \mu\text{m}$; aunque partículas muchos más pequeñas, en ciertos casos, pueden ser separadas.

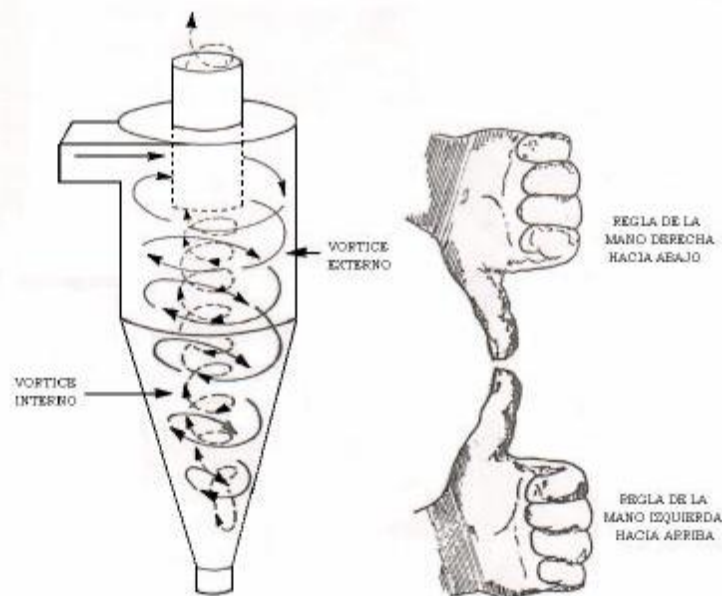
La fuerza centrífuga generada por los giros del gas dentro del ciclón puede ser mucho mayor que la fuerza gravitacional, ya que la fuerza centrífuga varía en magnitud dependiendo de la velocidad de giro del gas y del radio de giro.

Teóricamente el aumento de la velocidad de entrada al ciclón implicaría un aumento de la fuerza centrífuga y por lo tanto un aumento de la eficiencia, sin embargo velocidades de entrada muy altas generan la resuspensión de material particulado de las paredes internas del ciclón, lo cual disminuye la eficiencia del ciclón; adicionalmente aumentar la velocidad de entrada implica mayor consumo de energía.

2.7.1 Principio de funcionamiento. En un ciclón el gas entra en la cámara superior tangencialmente y desciende en espirales hasta el ápice de la sección cónica; luego asciende en un segundo espiral, con diámetro más pequeño, y sale por la parte superior a través de un ducto vertical centrado. Los sólidos se mueven radialmente hacia las paredes, se deslizan por las paredes, y son recogidos en la parte inferior.

El diseño apropiado de la sección cónica del ciclón obliga al cambio de dirección del vórtice descendente, el vórtice ascendente tiene un radio menor, lo que aumenta las velocidades tangenciales; en el cono se presenta la mayor colección de partículas, especialmente de las partículas pequeñas al reducirse el radio de giro.

Figura 20. Principio de funcionamiento de un ciclón.



Fuente: Diseño óptimo de ciclones, 2006, pág. 3

2.7.2 Ventajas de los ciclones. Las ventajas de los ciclones incluyen las siguientes:

Bajos costos de capital.

Falta de partes móviles, por lo tanto, pocos requerimientos de mantenimiento y bajos costos de operación.

Caída de presión relativamente baja, comparada con la cantidad de partículas removidas.

Las limitaciones de temperatura y presión dependen únicamente de los materiales de construcción.

Colección y disposición en seco.

Requisitos espaciales relativamente pequeños.

2.7.3 *Desventajas de los ciclones.* Las desventajas de los ciclones incluyen las siguientes:

Eficiencias de recolección de partículas suspendidas totales relativamente bajas, particularmente para partículas menores de 10 μm .

No pueden manejar materiales pegajosos o aglomerantes.

Las unidades de alta eficiencia pueden tener altas caídas de presión.

2.7.4 *Tipos de ciclones.* Los ciclones son un dispositivo de control de material particulado bastante estudiado, el diseño de un ciclón se basa normalmente en familias de ciclones que tienen proporciones definidas.

Las principales familias de ciclones de entrada tangencial son:

- Ciclones de alta eficiencia.
- Ciclones convencionales.
- Ciclones de alta capacidad.

Los márgenes de la eficiencia de remoción para los ciclones, están con frecuencia basados en las tres familias de ciclones, es decir, convencional, alta

eficiencia y alta capacidad. La tabla 1 presenta el intervalo de eficiencia de remoción para las diferentes familias de ciclones.

TABLA 1. Intervalo de eficiencia de remoción para las diferentes familias de ciclones.

Familia de ciclones	Eficiencia de remoción (%)		
	PST	PM 10	PM 2,5
Convencionales	70 – 90	30 – 90	0 – 40
Alta eficiencia	80 – 99	60 – 95	20 – 70
Alta capacidad	80 - 99	10 - 40	0 – 10

CAPÍTULO III

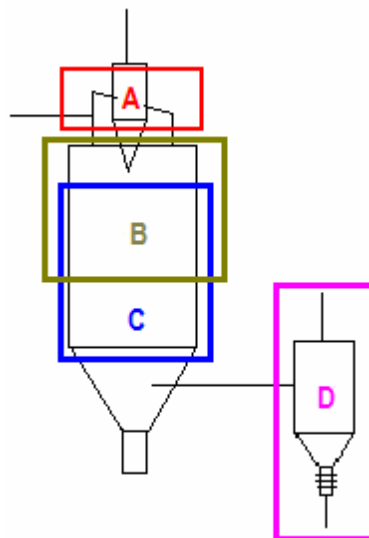
3. CONDICIONES REQUERIDAS EN EL PROCESO DE SECADO POR ASPERSIÓN

3.1 Análisis del proceso de secado por atomización

El secado por aspersión consiste en cuatro etapas:

- A) Atomización.
- B) Contacto aire-gota.
- C) Evaporación.
- D) Recuperación del producto seco.

Figura 21. Etapas del secado por aspersión



Fuente: Elaboración propia.

Atomización.- En esta etapa ingresa la alimentación del producto a secar, en estado líquido, al sistema de atomización el cual consta de un disco rotatorio que gira a altas velocidades, por efectos de la fuerza centrífuga generada por el disco el fluido es atomizado, el tamaño de las gotas está en función de la velocidad del disco.

Contacto aire-gota.- Cuando el líquido es atomizado dentro de la cámara de secado la gota se pone en contacto con el aire y sigue la trayectoria de la corriente de aire.

Evaporación.- Como el aire dentro de la cámara es previamente calentado a la temperatura de secado requerida se produce transferencia de calor hacia la gota y transferencia de masa hacia el aire.

Recuperación del producto seco.- Al final de la cámara de secado el aire y el producto seco se encuentra mezclado con el aire, para separar el producto del aire se usa separadores ciclónicos.

3.1.1 Consideraciones iniciales. Patiño (1995), Grajales (1996) y Mendoza (2003), reportan una secuencia de cálculo para el dimensionamiento de la cámara de un secador por aspersión que proviene de balances macroscópicos de materia y energía sobre el sistema analizado (cámara de secado) y bajo las condiciones de trabajo dadas. El tipo de aspersor usado por los autores es: atomizador rotatorio, boquilla neumática y boquilla de presión respectivamente.

Los criterios usados por dichos autores para el dimensionamiento, ya que estos determinan o no el secado exitoso de un fluido, son:

- La humedad relativa del aire a la salida de la cámara debe ser menor o igual que la humedad relativa del aire en equilibrio con la humedad deseada del producto, de tal forma que no humedezca al producto.
- El tiempo de secado de la gota asperjada, desde una humedad inicial hasta otra final, debe ser menor o igual al tiempo de viaje de la gota a la pared del secador y así evitar que se adhiera a ésta.
- El calor suministrado a la gota asperjada durante el tiempo de viaje de la misma a la pared del equipo debe ser mayor o igual al calor necesario para el secado.

Las características del sistema (cámara del secador por aspersión) en el presente trabajo son las siguientes:

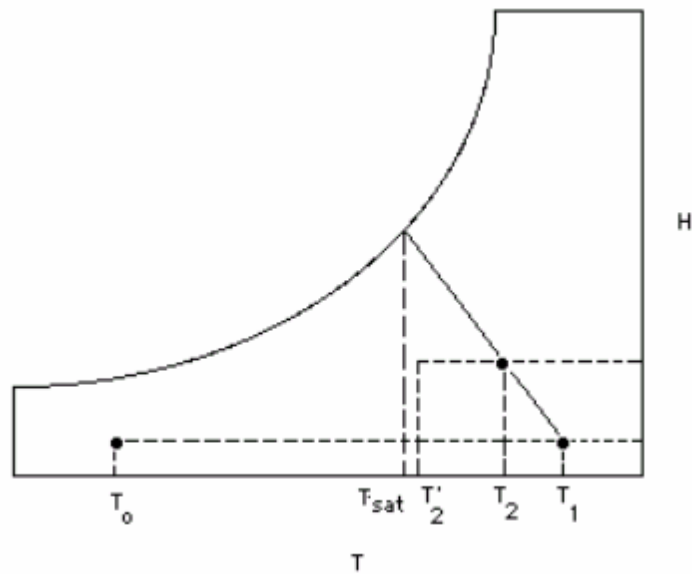
- El atomizador es de tipo rotatorio.
- Tanto la alimentación como el aire de secado entran por la parte superior de la cámara y viajan en la misma dirección (flujo paralelo), esto es para favorecer el secado de materiales termolábiles.
- El aire entra en forma tangencial, de tal forma que describe una trayectoria en espiral, ya que es comúnmente usada en la industria, además, existen ecuaciones empíricas que predicen las componentes radial, axial y tangencial de la velocidad del aire.

Si evaluáramos el funcionamiento del secador dentro de un gráfico psicrométrico, como el mostrado en la figura 3.2 veríamos que el aire se calienta a humedad constante ($T_0 \rightarrow T_1$).

Si la cámara estuviera aislada y toda la energía posible se utilizara, el aire se enfriaría adiabáticamente y la temperatura mínima a alcanzar sería la de bulbo seco de saturación (T_{sat}). En realidad, la cámara no está aislada y no se sigue un enfriamiento adiabático. El aire sale a una temperatura T_2' (ni está saturado ni el proceso fue adiabático), debido a la baja relación aire-producto.

Si el proceso fuera adiabático, saldría a T_2 (proceso adiabático y masas iguales de aire y producto).

Figura 22. Proceso psicrométrico del secadero por aspersión



Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Determinación de las condiciones de entrada del producto. Para la realización del diseño y dimensionamiento del secadero por aspersión es necesario determinar algunas propiedades del fluido que va a ingresar al atomizador, a continuación se muestran las propiedades requeridas para el diseño de la cámara de secado:

- Flujo de la alimentación
- Concentración de la alimentación
- Temperatura a la entrada de la cámara de secado
- Capacidad calorífica del sólido seco
- Conductividad térmica de la alimentación
- Viscosidad de la alimentación
- Densidad de la alimentación
- Densidad de los sólidos secos

3.1.3 Requerimiento del producto deshidratado. Los requerimientos dependen del proceso posterior al secado, los mismos que varían en función del tipo de sustancia seca.

Las variables a considerar a la salida del producto se mencionan a continuación:

- Temperatura del sólido a la salida del secadero.
- Humedad del producto a la salida del secadero.

Estos dos parámetros deben ser proporcionados según el requerimiento del sólido seco.

3.2 Sistema de transporte de la solución líquida

Al utilizar como medio atomizante un disco rotatorio lo recomendable es utilizar una bomba rotodinámica, el sistema constará de los siguientes elementos:

- Tanque de almacenamiento de la alimentación.- El volumen del tanque estará de acuerdo al consumo que se desee durante la operación y si el sistema es continuo o discontinuo.
- Tanque de agua.- Se utiliza para la limpieza del secadero, el atomizador debe ser alimentado por agua tanto en el arranque como en la parada.
- Bomba de alimentación.- Debe ser capaz de transportar la alimentación hacia el atomizador con el flujo y presión requerido por éste, además debe existir compatibilidad entre el material de la bomba y las propiedades de la sustancia a bombear.
- Ductos de transporte.- Su tamaño se seleccionará en función del caudal a transportar con la finalidad de minimizar las pérdidas por fricción, además se

debe considerar que el material sea el apropiado según la sustancia a transportar.

3.2.1 *Determinación de las sustancias a secar por aspersión.* La condición principal para poder secar un producto es que pueda ser bombeada para que la alimentación llegue en forma continua hasta el medio atomizante, existen diversas familias de productos las cuales pueden ser secadas por aspersión, entre las principales tenemos:

- Productos lácteos: leche, suero, caseinatos.
- Frutas: tomate, aguacate, durazno.
- Huevos: huevo entero, yema, clara de huevo.
- Cereales: almidón, gluten, proteína.
- Farmacéuticos: vitaminas, encimas, antibióticos.
- Sub productos del matadero: sangre de animales, extracto de carne, gelatina.
- Plásticos: melanina, resinas.
- Otros: café, cerámicas, detergentes, fertilizante, minerales.

3.2.2 *Determinación de las propiedades requeridas del producto.* El secado por aspersión es requerido en productos en los cuales:

- No puede evaporarse mecánicamente.
- Son sensibles a altas temperaturas.
- No puede exponerse a tiempos prolongados.

- Poseen un contenido ultra fino de partículas

Luego de realizado el secado por aspersión las propiedades del producto secado son:

- Posibilidad de densificación del producto.
- Posibilidad de aglomeración de partículas.
- Posibilidad de producto encapsulado.
- Rango del producto desde polvo impalpable hasta granulado pasando por polvos finos.
- Fácil de manejar
- Larga duración sin contaminación y sin descomposición.
- Conservación de características organolépticas.
- Disminución de procesos y mano de obra en su elaboración.
- Concentración homogénea del producto.
- Disminuye los costos y área de almacenamiento debido a la alta reducción de agua. (humedad final aprox. 4%).
- Disminución de costos energéticos, ya que los productos no requieren estar refrigerados.
- Abastecimiento de producto en tiempos de escasez.

3.3 Requerimientos del aire para el secado

El aire de secado será el encargado de evaporar el agua contenida en la alimentación, para ello en el próximo capítulo se realizará un balance de masa y

energía para calcular la cantidad de aire que se requiere, para el proceso de secado por atomización se requiere:

- Temperatura de entrada a la cámara
- Temperatura de salida de la cámara
- Humedad absoluta a la entrada de la cámara

La humedad del aire a la entrada de la cámara será igual a la humedad del aire en el ambiente en donde se instalará el secadero ya que se produce calentamiento sensible.

La temperatura de entrada y salida de la cámara de secado está en función del tipo de material a secar, para determinar dicha temperatura se debe realizar pruebas de laboratorio, en el anexo A se muestra una tabla que recopila una serie de productos en los cuales se ha establecido la temperatura del aire a la entrada y salida de la cámara de secado, así como el contenido de sólidos en la solución.

3.4 Sistema de pulverización de la pasta de alimentación

La elección de la boquilla para el secador depende de factores como el flujo de alimento y sus propiedades físicas como la viscosidad, tamaño de partícula deseado en el producto final, disposición respecto a la dirección del flujo del gas secante, diseño de la rueda que permita llevar el líquido a la velocidad periférica antes de la descarga, material de construcción y los costos.

La distribución del tamaño de partícula sobre el medio es casi constante para un método dado de atomización. Techando el medio por sí mismo puede variar desde tan pequeño como 15 μm hasta tan grande como 250 μm , dependiendo de la cantidad de energía transmitida al líquido. El flujo másico del líquido, su viscosidad, su contenido de sólidos y la tensión superficial, influyen directamente sobre el tamaño de partícula, pero ninguno al grado de la velocidad periférica de la rueda. En consecuencia un incremento en el caudal de alimentación puede incrementar

ligeramente el tamaño de partícula, pero empleando un variador de velocidad sobre el atomizador centrífugo se facilita la corrección sobre el tamaño especificado.

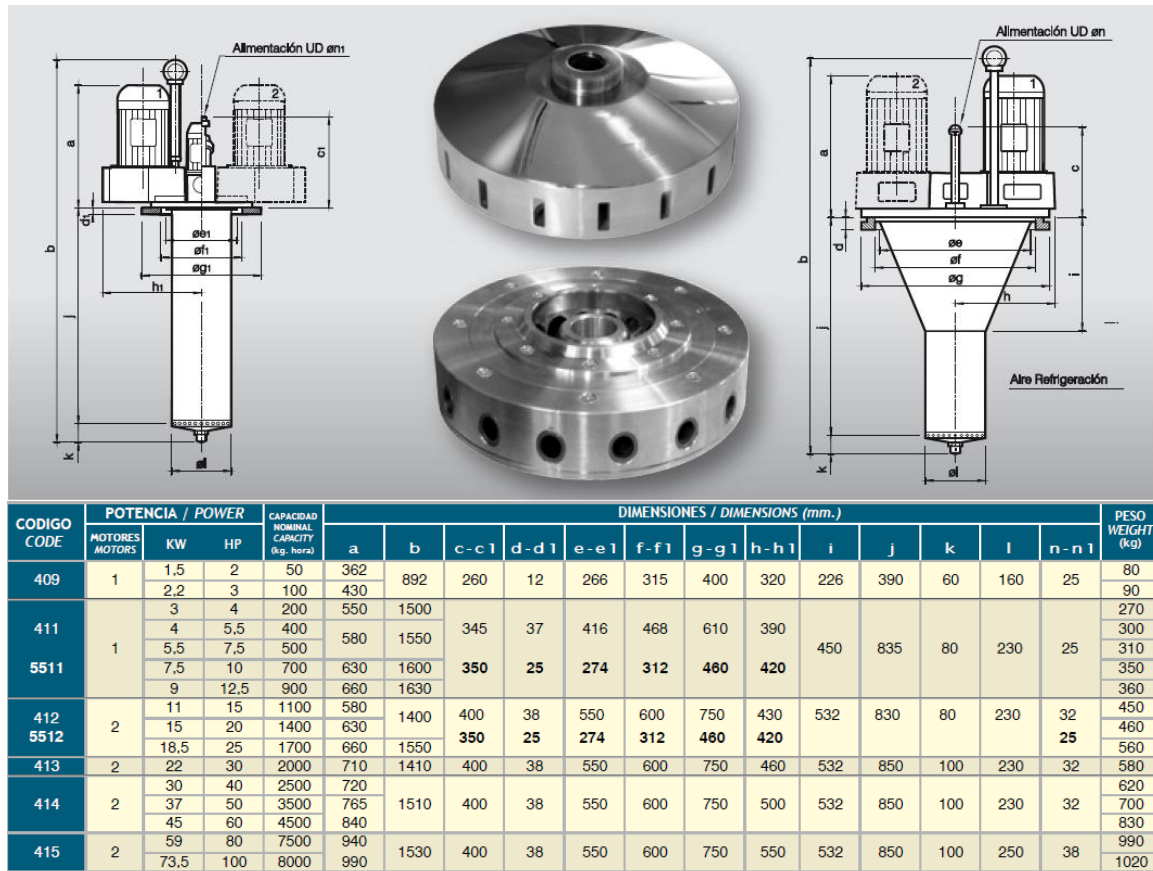
Una ventaja de la atomización centrífuga es que las máquinas atomizadoras están disponibles en muchos tamaños. Una pequeña unidad a nivel laboratorio impulsada con aire maneja de 1 a 10 litros por hora de alimentación de líquido, mientras que las unidades comerciales más grandes operadas por un motor de 850 kW pueden manejar hasta 200,000 kg/h.

3.4.1 *Análisis de los sistemas de pulverización.* Como se ha expuesto el diseño del atomizador debe permitir el mayor rango de productos para secar, por lo cual se ha determinado que la mejor opción para el medio atomizante es utilizar discos rotatorios, las características requeridas para la selección se mencionan a continuación:

- Diámetro del disco
- Número de aspas
- Altura de las aspas
- Velocidad del disco
- Flujo máximo de alimento
- Potencia requerida
- Material de construcción

En la siguiente figura se muestra una tabla de selección de discos rotatorios con sus respectivas medidas, la selección depende del flujo de alimentación requerido.

Figura 23. Selección de discos rotatorios



Fuente: Catálogo de “Atomizadores Centrífugos”, SIMES, pág. 2

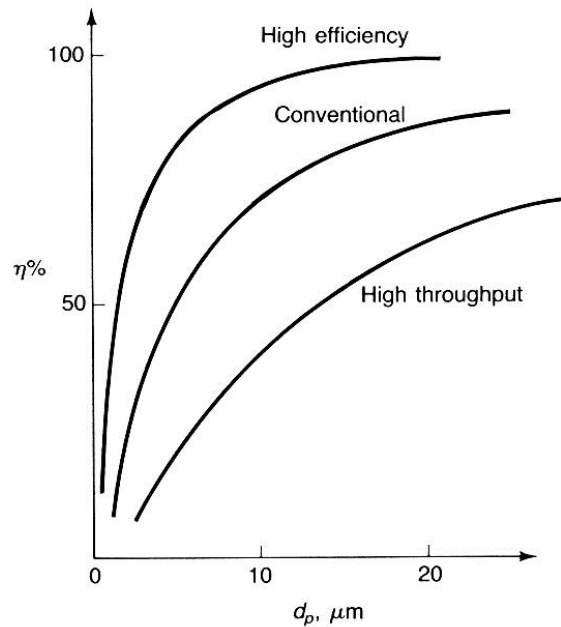
En la selección de la velocidad del disco se debe tener en cuenta que las partículas no superen los 170 μm . [7].

3.5 Sistema de separación de polvos

El sistema de separación de polvos constara de un ciclón el mismo será del tipo de alta eficiencia, para conservar en lo posible una totalidad del producto deshidratado.

En la siguiente figura se puede observar la eficiencia de este tipo de ciclones con respecto al tamaño de las partículas, además se la compara con la eficiencia de los demás tipos de ciclones.

Figura 24. Eficiencia de ciclones en función del tamaño de las partículas



Fuente: Diseño óptimo de ciclones, 2006, pág. 3

3.5.1 Consideraciones iniciales. Los ciclones de alta eficiencia están diseñados para alcanzar mayor remoción de las partículas pequeñas que los ciclones convencionales. Los ciclones de alta eficiencia pueden remover partículas de $5 \mu\text{m}$ con eficiencias hasta del 90%, pudiendo alcanzar mayores eficiencias con partículas más grandes. Los ciclones de alta eficiencia tienen mayores caídas de presión, lo cual requiere de mayores costos de energía para mover el gas sucio a través del ciclón. Por lo general, el diseño del ciclón está determinado por una limitación especificada de caída de presión, en lugar de cumplir con alguna eficiencia de control especificada.

3.5.2 Dimensionamiento del ciclón. Las tabla 2 presentan un resumen de las características de ciclones de alta eficiencia según el criterio de Stairmand (1951) y Swift (1969). La figura 25 identifica las principales dimensiones del ciclón de entrada tangencial.

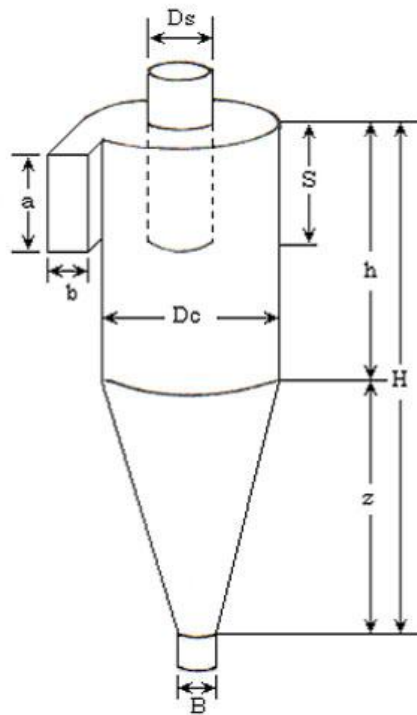
El diámetro del ciclón identifica la dimensión básica de diseño, todas las demás dimensiones simplemente son una proporción del diámetro del ciclón.

TABLA 2. Características de los ciclones de alta eficiencia.

Dimensión	Símbolo	Tipo Del Ciclón de Eficacia Alta	
		Stairmand	Swift
Diámetro Del Cuerpo	D/D	1,0	1,0
Altura de la entrada	a/D	0,5	0,44
Anchura de la entrada	b/D	0,2	0,21
Diámetro de la salida del gas	D_s/D	0,5	0,4
Longitud del buscador del vórtice	S/D	0,5	0,5
Longitud del cuerpo	h/D	1,5	1,4
Longitud del cono	z/D	2,5	2,5
Altura total del ciclón	H/D	4	4
Diámetro del enchufe del polvo	B/D	0,375	0,4
Factor de configuración	G	551,22	698,65
Número de cabezas de velocidad	N_H	6,4	9,24
Número de vórtices	N	5,5	6

Fuente: Diseño óptimo de ciclones, 2006, pág. 6.

Figura 25. Dimensiones del ciclón



Fuente: Diseño óptimo de ciclones, 2006, pág. 6.

El diseño del ciclón de alta eficiencia según Swift reporta un mayor rendimiento pero la caída de presión aumenta considerablemente con respecto a los ciclones diseñados según el criterio de Stairmand, por tal razón en este trabajo los ciclones se diseñarán según el criterio de Stairmand.

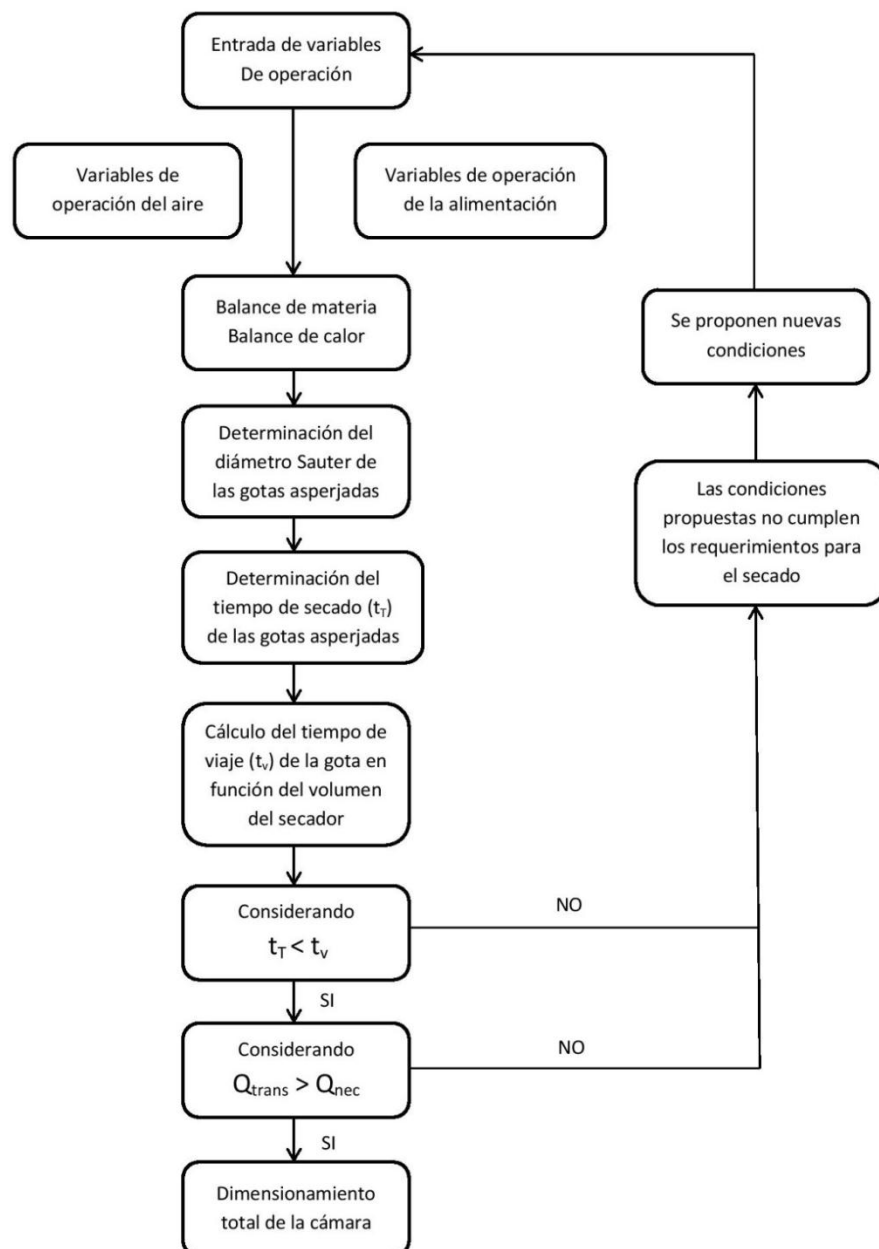
CAPÍTULO IV

4. DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA DE SECADO Y EQUIPO AUXILIARES

4.1 Dimensiones de la cámara de secado

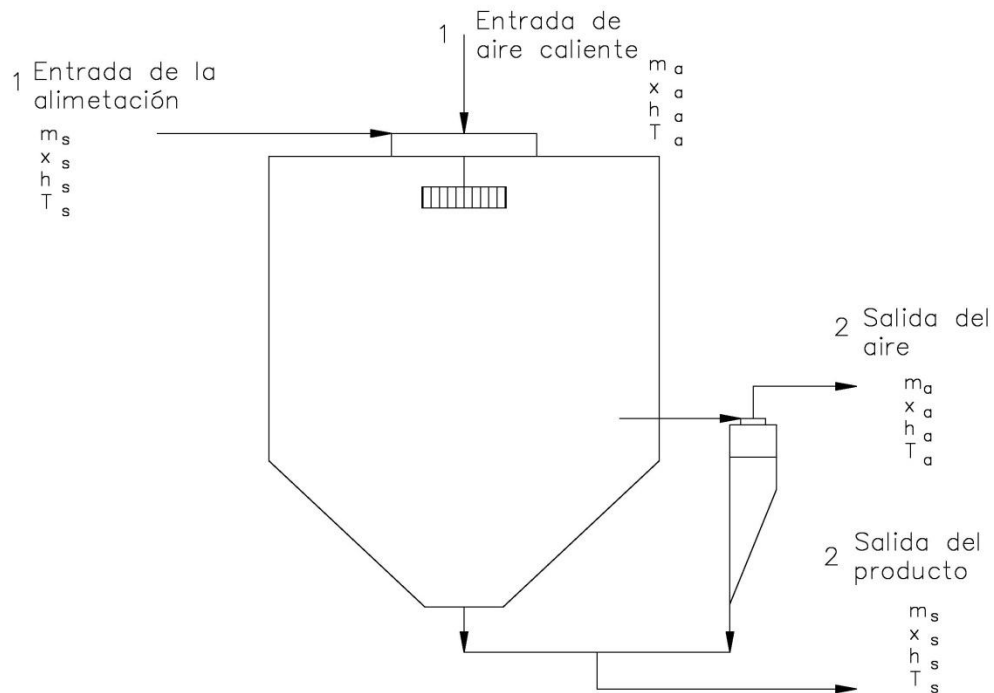
A continuación se presenta el diagrama de flujo para el cálculo de las dimensiones de la cámara de secado:

Figura 26. Diagrama de flujo para el dimensionamiento de la cámara de secado



4.1.1 Cálculo del flujo de aire necesario para la evaporación. Para calcular la cantidad de aire que se requiere para la evaporación del agua contenida en la alimentación realizamos en balance energético y de masa en la cámara de secado, a continuación se muestran las variables que intervienen en el proceso:

Figura 27. Balance de masa y energía sobre la cámara de secado



Primero se realizará el balance de flujo de masa de agua, para lo cual a continuación se calcula la cantidad de agua que posee la alimentación y el aire:

$$m_{sw} = m_{ss} \cdot x_s \quad (1)$$

Dónde:

m_{sw} = Flujo de masa de agua contenida en la alimentación (kg/s)

m_{ss} = Flujo de masa de sólidos secos de la alimentación (kg/s)

x_s = Humedad de la alimentación en base seca (kg_{agua}/kg_{ss})

El flujo de masa de sólidos secos de la alimentación la podemos calcular con la siguiente expresión:

$$m_{ss} = m_s \cdot \frac{\%SA}{100} \quad (2)$$

Dónde:

m_s = Flujo de masa de la alimentación (kg/s)

$\%SA$ = Porcentaje de sólidos (%)

La humedad de la alimentación se puede calcular así:

$$x_s = \frac{100 - \%SA}{\%SA} \quad (3)$$

Ahora el agua contenida en el aire se calcula así:

$$m_{a_w} = m_a \cdot x_a \quad (4)$$

Dónde:

m_{a_w} = Flujo de masa de agua contenida en el aire (kg/s)

x_a = Humedad del aire en base seca (kg_{agua}/kg_{ss})

Para el cálculo de la humedad del aire su utiliza la siguiente expresión:

$$x_a = 0,62 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (5)$$

Dónde:

p_v = Presión parcial de vapor (Pa)

p = Presión atmosférica del lugar (Pa)

La presión parcial de vapor es igual a:

$$p_v = \phi \cdot p_{vs} \quad (6)$$

Dónde:

ϕ = Humedad relativa del aire

p_{vs} = Presión de saturación de vapor (Pa)

La siguiente ecuación tipo Antoine propuesta por Wexler permite calcular la presión del vapor saturado en mbar en función de la temperatura en °C.

$$\ln p_{vs} = 19,016 - \frac{4064,95}{T_{a_e} + 236,25} \quad (7)$$

Dónde:

p_{vs} = Presión de saturación de vapor (mbar)

T_{a_e} = Temperatura del aire en el exterior (°C)

La presión de la localidad se puede obtener así:

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{h}{8600}} \quad (8)$$

Dónde:

p = Presión de la localidad (Pa)

p_0 = Presión a nivel del mar (101 325 Pa)

h = Altura sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)

El balance de agua en la cámara de secado será:

$$m_{s_{w1}} + m_{a_{w1}} = m_{s_{w2}} + m_{a_{w2}} \quad (9)$$

Dónde:

$m_{s_{w1}}$ = Flujo de masa de agua a contenida en la alimentación al ingreso de la cámara (kg/s)

$m_{s_{w2}}$ = Flujo de masa de agua a contenida en la alimentación a la salida de la cámara (kg)

$m_{a_{w1}}$ = Flujo de masa de agua a contenida en el aire al ingreso de la cámara (kg)

$m_{a_{w2}}$ = Flujo de masa de agua a contenida en el aire a la salida de la cámara (kg)

Reemplazando datos se obtiene:

$$m_{ss1} \cdot x_{s1} + m_{a1} \cdot x_{a1} = m_{ss2} \cdot x_{s2} + m_{a2} \cdot x_{a2} \quad (10)$$

Como no hay fugas ni retención del producto y del aire en la cámara, entonces:

$$m_{ss1} = m_{ss2} = m_{ss} \quad (11)$$

$$m_{a1} = m_{a2} = m_a \quad (12)$$

$$m_{ss} \cdot (x_{s1} - x_{s2}) = m_a \cdot (x_{a2} - x_{a1}) \quad (13)$$

El balance de energía sobre la cámara de secado es:

$$m_{s1} \cdot h_{s1} + m_{a1} \cdot h_{a1} = m_{s2} \cdot h_{s2} + m_{a2} \cdot h_{a2} \quad (14)$$

La entalpía de la alimentación es igual a la suma de la entalpía de los sólidos secos más la entalpia del agua contenida, por lo tanto:

$$m_s \cdot h_s = m_{ss} \cdot c_{ps}(T_s - T_o) + m_{ss} \cdot x_s \cdot c_{pw}(T_s - T_o) \quad (15)$$

Dónde:

c_{ps} = Calor específico del sólido seco (J/kg.K)

c_{pw} = Calor específico del agua (J/kg.K)

T_s = Temperatura de la alimentación (K)

T_o = Temperatura de referencia (273 K)

$$m_s \cdot h_s = m_{ss} \left(c_{ps}(T_s - T_o) + x_s \cdot c_{pw}(T_s - T_o) \right) \quad (16)$$

$$m_s \cdot h_s = m_{ss} (c_{ps} + x_s \cdot c_{pw})(T_s - T_o) \quad (17)$$

Considerando:

$$H_s = (c_{ps} + x_s \cdot c_{pw})(T_s - T_o) \quad (18)$$

La temperatura T_{s1} es la temperatura de bombeo de la alimentación, mientras que T_{s2} se considera igual a la temperatura del aire a la salida de la cámara de secado con una diferencia de 10°C.

Entonces:

$$m_s \cdot h_s = m_{ss} \cdot H_s \quad (19)$$

La entalpía del aire es igual a la suma de la entalpía del aire seco, del vapor de agua y la energía requerida para la evaporación, entonces:

$$m_a \cdot h_a = m_a \cdot c_{pa}(T_a - T_o) + m_a \cdot x_a \cdot c_v(T_a - T_o) + m_a \cdot x_a \cdot \lambda_o \quad (20)$$

Dónde:

c_{pa} = Calor específico del aire seco (J/kg.K)

c_v = Calor específico del vapor de agua (J/kg.K)

λ_o = Calor latente de vaporización (J/kg)

T_a = Temperatura del aire (K)

T_o = Temperatura de referencia (273 K)

En el anexo B se muestra una tabla con el calor específico de varias sustancias, los valores se deben escoger para la temperatura de referencia 0°C.

El calor latente de vaporización su puede calcular con la siguiente expresión:

$$\lambda_o = 2502535,259 - 2385,76424 \cdot T_a \quad (21)$$

Dónde:

T_a = Temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)

Considerando que este valor se debe multiplicar por la humedad específica la variación que este sufre con respecto a la temperatura puede ser despreciable para el cálculo de la entalpía del aire y se recomienda utilizar un valor constante de:

$$\lambda_o = 2502535,259 \quad (22)$$

Agrupando se tiene:

$$m_a \cdot h_a = m_a \cdot (c_{pa}(T_a - T_o) + x_a \cdot c_v(T_a - T_o) + x_a \cdot \lambda_o) \quad (23)$$

$$m_a \cdot h_a = m_a \cdot ((c_{pa} + x_a \cdot c_v)(T_a - T_o) + x_a \cdot \lambda_o) \quad (24)$$

Considerando:

$$H_a = ((c_{pa} + x_a \cdot c_v)(T_a - T_o) + x_a \cdot \lambda_o) \quad (25)$$

Entonces:

$$m_a \cdot h_a = m_a \cdot H_a \quad (26)$$

Reemplazando las ecuaciones (19) y (26) en (14) se obtiene:

$$m_{ss}(H_{s1} - H_{s2}) = m_a ((c_{pa} + x_{a2} \cdot c_v)(T_{a2} - T_o) + x_{a2} \cdot \lambda_{o2} - (c_{pa} + x_{a1} \cdot c_v)(T_{a1} - T_o) - x_{a1} \cdot \lambda_{o1}) \quad (27)$$

Como todas las propiedades del aire en condiciones 1 son conocidas se tendrá:

$$H_{a1} = (c_{pa} + x_{a1} \cdot c_v)(T_{a1} - T_o) + x_{a1} \cdot \lambda_{o1} \quad (28)$$

Reemplazando y agrupando:

$$m_{ss}(H_{s1} - H_{s2}) = m_a \left((c_{pa} + x_{a2} \cdot c_v)(T_{a2} - T_o) + x_{a2} \cdot \lambda_{o2} - H_{a1} \right) \quad (29)$$

Resolviendo las ecuaciones (29) y (13) y despejando x_{a2} se obtiene:

$$x_{a2} = \frac{[H_{a1} - c_{pa}(T_{a2} - T_o)](x_{s1} - x_{s2}) + x_{a1}(H_{s2} - H_{s1})}{[c_v(T_{a2} - T_o) + \lambda_o](x_{s1} - x_{s2}) + (H_{s2} - H_{s1})} \quad (30)$$

Despejando de la ecuación (13) el flujo de aire será igual a:

$$m_a = m_{ss} \cdot \frac{(x_{s1} - x_{s2})}{(x_{a2} - x_{a1})} \quad (31)$$

4.1.2 Diámetro Sauter. El diámetro Sauter se define como el diámetro de una gota que tiene la misma relación superficie-volumen que la de todas las gotas por aspersión o muestra de partículas.

Existen diversas correlaciones que permiten predecir las características de la nube asperjada por atomizadores rotatorios que dependen de la velocidad periférica del disco, flujo de alimentación, densidad, diámetro del atomizador, etc.

$$D_{vs} = \frac{5240 \cdot M_p^{0,171}}{(\pi \cdot D_r \cdot N)^{0,537} \mu_s^{0,017}} \quad (32)$$

Dónde:

D_{vs} = Diámetro Sauter de las gotas asperjadas (μm)

M_p = Flujo másico de la alimentación por cada paleta del atomizador (g/s.cm)

D_r = Diámetro del atomizador (cm)

N = Velocidad angular del atomizador (rev/s)

μ_s = Viscosidad de la alimentación (P)

El flujo másico de la alimentación por cada paleta del atomizador se calcula con la así:

$$M_p = 10 \frac{m_s}{h_p \cdot n_p} \quad (33)$$

Dónde:

M_p = Flujo másico de la alimentación por cada paleta del atomizador (g/s.cm)

m_s = Flujo de alimentación (kg/s)

h_p = Altura de la paleta del atomizador (m)

n_p = Número de paletas del atomizador

El dimensionamiento de la cámara se realizará en función del diámetro de la gota D_{95} es decir, el diámetro dentro del cual se encuentra el 95% de la nube asperjada, de tal forma que si se garantiza que una gota de éste tamaño se seca antes de llegar a la pared de la cámara entonces el 95% de la nube también lo hará, por lo tanto:

$$D_{95} = 1,4D_{vs} \quad (34)$$

4.1.3 Diámetro, humedad y temperatura de la gota en el punto crítico. El punto que divide el período de velocidad de secado constante y velocidad decreciente es el punto crítico, una vez que se alcanza éste el diámetro de la gota permanece constante hasta la salida de la cámara de secado y se denomina diámetro crítico, el mismo puede ser calculado a partir de un balance de materia de los sólidos secos de la gota.

Por lo tanto suponiendo que no hay ruptura ni coalescencia de las mismas, la masa de los sólidos secos de la gota se mantiene constante desde la entrada a la salida de la cámara de secado, entonces:

$$\frac{m_{g1}}{1+x_{s1}} = \frac{m_{g2}}{1+x_{s2}} \quad (35)$$

Dónde:

m_{sg_1} = Masa de la gota a la entrada de la cámara de secado (kg)

x_{s1} = Humedad de la alimentación a la entrada de la cámara ($\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}}$)

m_{sg_2} = Masa de la gota a la salida de la cámara de secado (kg)

x_{s2} = Humedad de la alimentación a la salida de la cámara ($\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}}$)

La masa de la gota se puede calcular así:

$$m_g = V_g \cdot \rho_s \quad (36)$$

Dónde:

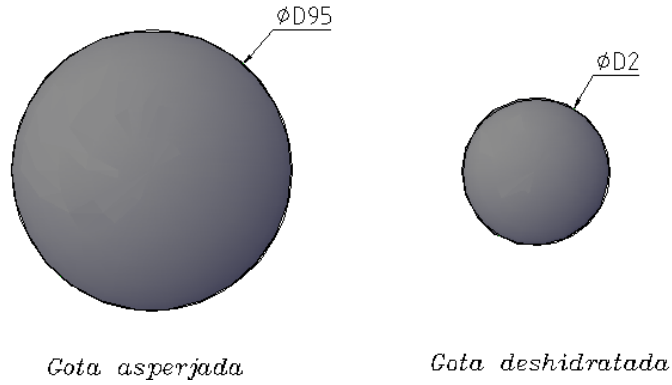
V_g = Volumen de la gota (m^3)

ρ_s = Densidad de la gota (kg/m^3)

A la entrada se considera la densidad de la alimentación, mientras que a la salida de la cámara la densidad de los sólidos secos.

La forma de las gotas asperjadas es esférica tal como se muestra en la figura 28 en donde además se muestra el tamaño al ser asperjadas y deshidratadas.

Figura 28. Forma y tamaño de la gota atomizada y deshidratada



Así que la masa se puede expresar de la siguiente forma:

$$m_g = \frac{4}{3} \pi \frac{D_g^3}{8} \cdot \rho_s \quad (37)$$

A la entrada el diámetro de la gota es D_{95} mientras que a la salida, como después del punto crítico el diámetro permanece constante, el diámetro $D_2 = D_c$ reemplazando en la ecuación (4.35) se obtiene:

$$\frac{\frac{4}{3} \pi \frac{D_{95}^3}{8} \cdot \rho_s}{1 + x_{s1}} = \frac{\frac{4}{3} \pi \frac{D_c^3}{8} \cdot \rho_{ss}}{1 + x_{s2}} \quad (38)$$

Simplificando y despejando el diámetro crítico se tiene:

$$D_c = D_{95} \left[\frac{\rho_s}{\rho_{ss}} \frac{1 + x_{s2}}{1 + x_{s1}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (39)$$

Dónde:

D_c = Diámetro de la gota en el punto crítico (m)

D_{95} = Diámetro de la gota en a la entrada (m)

ρ_s = Densidad de la alimentación (kg/m^3)

ρ_{ss} = Densidad de los sólidos secos (kg/m^3)

La disminución del diámetro de la gota se debe a la pérdida de humedad, de tal forma que la humedad removida de la gota cuando se alcanza el punto crítico puede escribirse como:

$$a_r = (V_{g_1} - V_{g_c}) \cdot \rho_w \quad (40)$$

$$a_r = \left(\frac{4}{3} \pi \frac{D_{95}^3}{8} - \frac{4}{3} \pi \frac{D_c^3}{8} \right) \cdot \rho_w \quad (41)$$

$$a_r = \frac{\pi}{6} (D_{95}^3 - D_c^3) \cdot \rho_w \quad (42)$$

Dónde:

a_r = Humedad removida hasta el punto crítico (kg)

ρ_w = Densidad del agua (kg/m³)

Ahora la humedad remanente de la gota será la diferencia entre la humedad inicial y la humedad removida, por lo tanto:

$$a_p = \frac{m_{g_1}}{1 + x_{s_1}} \cdot x_{s_1} - a_r \quad (43)$$

$$a_p = \frac{\pi}{6} \left(\frac{D_{95}^3 \rho_s}{1 + x_{s_1}} \right) \cdot x_{s_1} - a_r \quad (44)$$

La humedad absoluta de la gota cuando se alcanza el punto crítico, se calcula dividiendo la humedad remanente para la masa de sólidos que posee la gota.

$$x_{s_c} = \frac{a_p}{\frac{\pi}{6} \left(\frac{D_{95}^3 \rho_s}{1 + x_{s_1}} \right)} \quad (45)$$

La temperatura superficial de una gota que contiene sólidos insolubles o soluciones no electrolíticas en el período de velocidad constante puede ser considerado como la temperatura de bulbo húmedo del aire de secado de forma tal que en el punto crítico la temperatura de la gota está dada por:

$$T_{s_c} = T_{bh_1} \quad (46)$$

Dónde:

T_{s_c} = Temperatura superficial de la gota en el punto crítico (K)

T_{bh_1} = Temperatura de bulbo húmedo del aire de secado (K)

Para determinar la temperatura de bulbo húmedo se utiliza la siguiente expresión:

$$P_v - P_{g_{Tbh}} = -66(T_{a_1} - T_{bh_1}) \quad (47)$$

Dónde la presión de saturación debe ser evaluada a la temperatura de bulbo húmedo:

$$P_{g_{Tbh}} = 100 \left(e^{19,016 - \frac{4064,95}{T_{bh_1} + 236,25}} \right) \quad (48)$$

Como se aprecia se debe resolver las 2 ecuaciones anteriores para obtener la temperatura de bulbo húmedo, para ello se utiliza el método de la secante.

4.1.4 Humedad y temperatura del aire en el punto crítico. La humedad absoluta del aire cuando se alcanza el punto crítico se obtiene del balance de agua sobre la cámara de secado desde la entrada hasta el punto crítico, entonces:

$$m_{ss} \cdot (x_{s_1} - x_{s_c}) = m_a \cdot (x_{a_c} - x_{a_1}) \quad (49)$$

$$x_{a_c} = x_{a_1} + \frac{m_{ss} \cdot (x_{s_1} - x_{s_c})}{m_a} \quad (50)$$

La temperatura del aire cuando alcanza el punto crítico la podemos calcular a partir del cálculo de la entalpia del aire en el punto crítico:

$$H_{a_c} = (c_{pa} + x_{a_c} \cdot c_v)(T_{a_c} - T_o) + x_{a_c} \cdot \lambda_o \quad (51)$$

Despejando la temperatura en el punto crítico se obtiene:

$$T_{a_c} = T_o + \frac{H_{a_c} - x_{a_c} \cdot \lambda_o}{c_{pa} + x_{a_c} \cdot c_v} \quad (52)$$

Dónde H_{a_c} se obtiene del balance de energía sobre la cámara de secado desde la entrada hasta el punto crítico:

$$H_{a_c} = H_{a_1} + \frac{m_{ss} \cdot (H_{s_1} - H_{s_c})}{m_a} \quad (53)$$

La entalpía de los sólidos cuando se alcanza el punto crítico se calcula de la siguiente forma:

$$H_{s_c} = (c_{ps} + x_{s_c} \cdot c_{pw})(T_{s_c} - T_o) \quad (54)$$

4.1.5 Tiempo de secado. Como se mencionó anteriormente existen dos periodos de secado: el de velocidad constante y el de velocidad decreciente, por lo tanto, el tiempo total de secado se define como:

$$t_T = t_c + t_d \quad (55)$$

Dónde:

t_T = Tiempo total de secado (s)

t_c = Tiempo de secado en el período de velocidad constante (s)

t_d = Tiempo de secado en el período de velocidad decreciente (s)

El tiempo de secado en el período de velocidad constante puede deducirse a partir de un balance de calor sobre la gota asperjada suponiendo un equilibrio

dinámico, dónde la velocidad de transferencia de calor es igual a la velocidad de transferencia de masa multiplicada por el calor latente de vaporización, así:

$$h_c \cdot A \cdot \Delta T_{ml1} = -\lambda_{bh} \frac{dm_d}{dt} \quad (56)$$

Dónde:

h_c = Coeficiente de transferencia de calor (W/m²K)

A = Área de la gota (m²)

ΔT_{ml1} = Media logarítmica de temperatura entre la gota y el aire desde la entrada hasta el punto crítico (K)

λ_{bh} = Calor latente de vaporización a la temperatura de bulbo húmedo (J/kg)

$\frac{dm_d}{dt}$ = Velocidad de transferencia de masa (kg/s)

El área de la gota al tener forma esférica se puede obtener con la siguiente expresión:

$$A = \pi D_g^2 \quad (57)$$

La masa de la gota es igual al producto de su volumen por su densidad:

$$m_d = \frac{\pi}{6} D_g^3 \cdot \rho_w \quad (58)$$

Sustituyendo (57) y (58) en (56) se obtiene:

$$h_c \cdot (\pi D_g^2) \cdot \Delta T_{ml1} = -\frac{\pi}{6} \lambda_{bh} \cdot \rho_w \frac{d(D_g^3)}{dt} \quad (59)$$

$$dt = \frac{-\frac{\pi}{6} \lambda_{bh} \cdot \rho_w \cdot 3 D_g^2}{h_c \cdot (\pi D_g^2) \cdot \Delta T_{ml1}} dD_g \quad (60)$$

$$dt = -\frac{\lambda_{bh} \cdot \rho_w}{2 \cdot h_c \cdot \Delta T_{ml1}} dD_g \quad (61)$$

Integrando desde la entrada a la cámara de secado hasta el punto crítico se tiene:

$$\int_0^{t_c} dt = -\frac{\lambda_{bh} \cdot \rho_w}{2 \cdot \Delta T_{ml1}} \int_{D_{95}}^{D_c} \frac{dD_g}{h_c} \quad (62)$$

La media logarítmica de temperaturas en el período de velocidad constante es igual a:

$$\Delta T_{ml1} = \frac{(T_{a1} - T_{s1}) - (T_{ac} - T_{sc})}{\ln \left(\frac{T_{a1} - T_{s1}}{T_{ac} - T_{sc}} \right)} \quad (63)$$

El calor latente de vaporización debe ser evaluado a la temperatura de bulbo húmedo del aire.

$$\lambda_{bh} = 2502535,259 - 2385,76424 \cdot T_{bh} \quad (64)$$

El coeficiente de transferencia de calor puede despejarse del número de Nusselt, quedando:

$$h_c = \frac{N_u \cdot k_d}{D_g} \quad (65)$$

Dónde:

N_u = Número de Nusselt

k_d = Conductividad térmica de la película de aire que rodea la gota (W/mK)

Para la transferencia de calor entre un fluido en movimiento y la superficie de una esfera se recomienda la siguiente ecuación:

$$N_u = 2 + 0,6 Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (66)$$

Dónde:

Re = Número de Reynolds

Pr = Número de Prandtl

El número de Reynolds es igual a:

$$Re = \frac{D_g \cdot V_{rel}}{\nu} \quad (67)$$

Como la velocidad relativa de la gota con respecto al aire (V_{rel}) es despreciable el número de Reynolds queda:

$$Re = 0 \quad (68)$$

Por lo tanto el número de Nusselt es igual a:

$$Nu = 2 \quad (69)$$

La conductividad térmica de la película de aire varía con respecto a la temperatura en el anexo C se muestra una tabla con sus respectivos valores, cabe mencionar que la conductividad térmica se evalúa a una temperatura promedio entre la temperatura del aire y la temperatura superficial de la gota.

Reemplazando los datos en la integral obtenemos:

$$\int_0^{t_c} dt = -\frac{\lambda_{bh} \cdot \rho_w}{2 \cdot \Delta T_{ml1}} \int_{D_{95}}^{D_c} \frac{dD_g}{\frac{2 \cdot k_d}{D_g}} \quad (70)$$

Integrando:

$$t_c = \frac{\lambda_{bh} \cdot \rho_w}{8 \cdot k_d \cdot \Delta T_{ml1}} (D_{95}^2 - D_c^2) \quad (71)$$

El tiempo de secado en el período de velocidad decreciente se calcula siguiendo el mismo procedimiento que el cálculo para el tiempo de secado en el periodo de velocidad constante, la única diferencia es que como el diámetro de la

gota permanece constante la masa de la gota se define en función de su humedad así:

$$m_d = \frac{\pi}{6} D_c^3 \cdot \rho_{ss} \cdot x_s \quad (72)$$

Reemplazando esta expresión en la ecuación (4.56) se tiene:

$$\frac{2k_d}{D_c} \cdot (\pi D_c^2) \cdot \Delta T_{ml1} = -\frac{\pi}{6} \lambda_{bh} \cdot D_c^3 \cdot \rho_{ss} \frac{d(x_s)}{dt} \quad (73)$$

$$dt = \frac{-\lambda_{bh} \cdot D_c^2 \cdot \rho_{ss}}{12k_d \cdot \Delta T_{ml2}} d(x_s) \quad (74)$$

Integrando desde el punto crítico hasta la salida de la cámara de secado:

$$\int_0^{t_d} dt = \frac{-\lambda_{bh} \cdot D_c^2 \cdot \rho_{ss}}{12k_d \cdot \Delta T_{ml2}} \int_{x_c}^{x_2} d(x_s) \quad (75)$$

$$t_d = \frac{\lambda_{bh} \cdot D_c^2 \cdot \rho_{ss}}{12k_d \cdot \Delta T_{ml2}} (x_{sc} - x_{s2}) \quad (76)$$

La media logarítmica de temperaturas en el período de velocidad decreciente se calcula a continuación:

$$\Delta T_{ml2} = \frac{(T_{ac} - T_{sc}) - (T_{a2} - T_{s2})}{\ln \left(\frac{T_{ac} - T_{sc}}{T_{a2} - T_{s2}} \right)} \quad (77)$$

4.1.6 Tiempo de viaje de la gota a la pared de la cámara de secado. El tiempo de viaje de la gota a la pared de la cámara de secado se obtiene con la siguiente expresión [8]:

$$t_v = \frac{\left(R_{cs} - \frac{D_r}{4} \right)^2}{2,4 V_{res} \left(b \frac{D_r}{2} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (78)$$

Dónde:

t_v = Tiempo de viaje de la gota a la pared de la cámara de secado (s)

R_{cs} = Radio de la cámara de secado (m)

D_r = Diámetro del atomizador (m)

V_{res} = Velocidad de la gota que sale del atomizador (m/s)

b = Ancho de un chorro de aire que sale del atomizador (m)

Según las condiciones para el diseño de la cámara de secado se debe cumplir que el tiempo de viaje de la gota sea mayor o igual al tiempo de secado, por lo tanto para cumplir con esta condición se establece:

$$t_v = t_T \quad (79)$$

Así que despejando el radio de la cámara de secado de la ecuación (78) se tiene:

$$R_{cs} = \frac{D_r}{4} + \left[2,4 t_T V_{res} \left(b \frac{D_r}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (80)$$

La velocidad de la gota que sale del atomizador rotatorio se define como la suma de sus componentes:

$$V_{res} = \sqrt{V_t^2 + V_r^2 + V_a^2} \quad (81)$$

Dónde:

V_t = Velocidad tangencial de la gota (m/s)

V_r = Velocidad radial de la gota (m/s)

V_a = Velocidad axial de la gota (m/s)

La velocidad tangencial de las gotas que salen del atomizador rotatorio se calcula con la siguiente expresión:

$$V_t = \frac{\pi}{60} D_r \cdot N \quad (82)$$

Dónde:

N = Velocidad angular del atomizador (rpm)

La velocidad radial de las gotas que salen del atomizador se calcula así [9]:

$$V_r = 0,02307 \left(\frac{m_s^2 \cdot N^2 \cdot D_r}{\rho_s \cdot \mu_s \cdot n_p^2 \cdot h_p^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (83)$$

La velocidad axial de las gotas que salen del atomizador es considerable despreciable ya que el ángulo de atomización es de 180° , por lo tanto:

$$V_a = 0 \quad (84)$$

La anchura de un chorro imaginario de aire que sale del disco rotatorio con la misma composición de aire a la salida de la cámara de secado, es igual a:

$$b = \frac{m_s}{\pi \cdot \rho_{a2} \cdot D_r \cdot V_{res}} \quad (85)$$

Dónde la densidad del aire (ρ_{a2}) se evalúa a la temperatura del aire de salida de la cámara de secado y su obtiene con la siguiente expresión:

$$\rho_{a2} = \frac{p_o - p_{v2}}{287 \cdot T_{a2}} (1 + x_{a2}) \quad (86)$$

Dónde:

p_o = Presión atmosférica de la localidad (Pa)

p_{v2} = Presión parcial del vapor del aire a la salida de la cámara (Pa)

T_{a2} = Temperatura del aire a la salida de la cámara de secado (K)

La presión parcial del vapor del aire a la salida de la cámara de secado se obtiene así:

$$p_{v2} = \frac{x_{a2} \cdot p_o}{x_{a2} + 0,622} \quad (87)$$

Finalmente el diámetro de la cámara de secado es igual a:

$$D_{cs} = 2 \cdot R_{cs} \quad (88)$$

4.1.7 *Calor transferido a la gota durante el tiempo de viaje.* El flujo de calor transferido por convección a la alimentación durante el tiempo de viaje a la pared de la cámara se calcula con la siguiente expresión [8]:

$$Q_{tf} = \frac{12k_{d1} \cdot \Delta T_{ml3}}{\rho_s \cdot D_{95}^2} \cdot m_s \cdot t_v \quad (89)$$

La conductividad térmica de la película de aire que rodea la gota (k_{d1}) se evalúa a una temperatura promedio entre la temperatura del aire y la temperatura superficial de la gota.

La media logarítmica de temperaturas durante el proceso de secado se calcula a continuación:

$$\Delta T_{ml3} = \frac{(T_{a1} - T_{s1}) - (T_{a2} - T_{s2})}{\ln \left(\frac{T_{a1} - T_{s1}}{T_{a2} - T_{s2}} \right)} \quad (90)$$

El flujo de calor necesario para secar la alimentación se calcula así:

$$Q_{nec} = m_a \cdot (c_{pa} + x_{a1} \cdot c_v) (T_{a1} - T_{a2}) \quad (91)$$

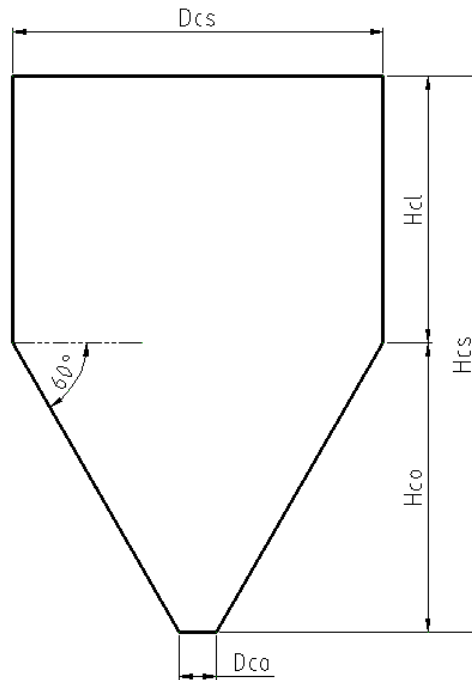
Las condiciones propuestas deben cumplir la condición:

$$Q_{tf} \geq Q_{nec} \quad (92)$$

En caso de no cumplirse la condición se debe aumentar el valor del calor transferido aumentando el tiempo de viaje de la gota, para lo cual se aumenta gradualmente el radio de la cámara de secado.

4.1.8 Dimensiones de la cámara de secado. La cámara de secado tiene la siguiente forma:

Figura 29. Dimensiones de la cámara de secado



Dónde:

D_{cs} = Diámetro de la cámara de secado (m)

H_{cs} = Altura de la cámara de secado (m)

H_{cl} = Altura del cilindro de la cámara de secado (m)

H_{co} = Altura del cono de la cámara de secado (m)

D_{co} = Diámetro del cono de la cámara de secado (m)

La relación entre las dimensiones de la cámara de secado se exponen a continuación: [1].

$$H_{cs} = 1,5D_{cs} \quad (93)$$

$$D_{co} = \frac{D_{cs}}{10} \quad (94)$$

$$H_{co} = \left(\frac{D_{cs} - D_{co}}{2} \right) tg 60^\circ \quad (95)$$

$$H_{cl} = H_{cs} - H_{co} \quad (96)$$

4.1.9 Eficiencia térmica del secador por aspersión. La eficiencia térmica de la operación de secado se define como la relación entre el calor usado para la evaporación y el calor total disponible si el aire de salida está saturado, así [10]:

$$\eta_t = \frac{m_{ss} \cdot (x_{s1} - x_{s2}) \lambda_{bh}}{m_a \cdot (c_{pa} + x_{a1} \cdot c_v) (T_{a1} - T_{bh1})} \quad (97)$$

4.2 Dimensionamiento de equipos auxiliares

Los equipos que componen el secadero por aspersión son los siguientes:

- Quemador
- Ventilador
- Bomba de alimentación
- Ciclón

A continuación se detalla el procedimiento para la selección de cada uno de ellos.

4.2.1 Dimensionamiento del quemador. Un quemador es un dispositivo para quemar combustible líquido, gaseoso o ambos y producir calor generalmente mediante una llama.

Lo primero que se debe hacer es seleccionar el tipo de combustible que se va a utilizar en el quemador, Para una adecuada selección del combustible se hace necesario tener ciertas consideraciones como son:

El funcionamiento del secador será en forma continua, el aspecto económico, en el que se considera la vinculación de los costos de instalación necesarios para su almacenamiento, transporte y dosificación.

Se plantea tres alternativas que son disponibles en el mercado ecuatoriano:

- a) Alternativa 1: Gas oil (Diesel N°2 utilizado en automóviles a diesel)
- b) Alternativa 2: Fuel oil (Combustóleo utilizado en calderas y hornos)
- c) Alternativa 3: GLP (Gas licuado de petróleo, combustible doméstico)

TABLA 3. Consideraciones para la elección del combustible.

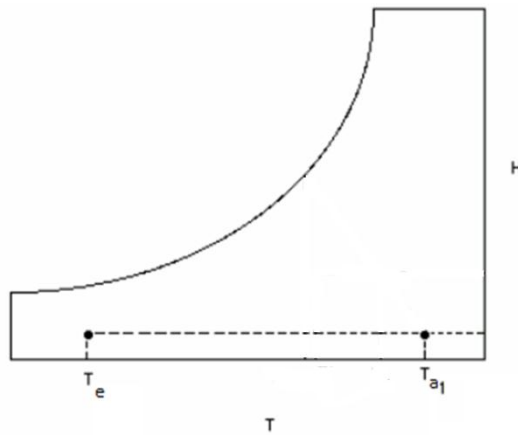
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Instalaciones	6	7	8
Poder calorífico	8	7	9
Almacenamiento	8	7	7
Transporte	8	8	9
Dosificación	8	7	7
Total	38	36	40

Para dar el valor indicado en las consideraciones anteriores cada una se valora en 10 puntos, los valores altos corresponden a propiedades de relativa facilidad, valores bajos corresponde a situaciones de dificultad, el valor total informará la mejor alternativa.

De los resultados de la tabla anterior se pueden concluir que la alternativa 3 resulta más adecuada en consecuencia se empleará el combustible GLP, ahora es necesario calcular el calor que se debe aportar.

El quemador se encarga de calentar el aire requerido para el proceso de secado desde la temperatura ambiente (T_{ae}) hasta la temperatura a la entrada en la cámara de secado (T_{a1}), como se puede observar en la figura 30 se produce un calentamiento sensible del aire por lo tanto la humedad absoluta permanece constante.

Figura 30. Proceso de calentamiento sensible



Entonces el calor que se debe aportar es igual a:

$$Q = m_a \cdot (H_{a1} - H_{ae}) \quad (98)$$

Dónde las entalpías del aire se calculan así:

$$H_{a1} = ((c_{pa} + x_{a1} \cdot c_v)(T_{a1} - T_o) + x_{a1} \cdot \lambda_o) \quad (99)$$

$$H_{ae} = ((c_{pa} + x_{a1} \cdot c_v)(T_{ae} - T_o) + x_{a1} \cdot \lambda_o) \quad (100)$$

Reemplazando y agrupando se obtiene:

$$Q = m_a \cdot (c_{pa} + x_{a1} \cdot c_v)(T_{a1} - T_{ae}) \quad (101)$$

La potencia térmica se debe corregir debido a la altitud de la localidad en donde este se instale, así:

$$Q_q = \frac{Q}{f_q} \quad (102)$$

El factor de corrección por altitud f_q se lo puede hallar en la siguiente tabla:

TABLA 4. Factores de reducción de la potencia térmica por altitud

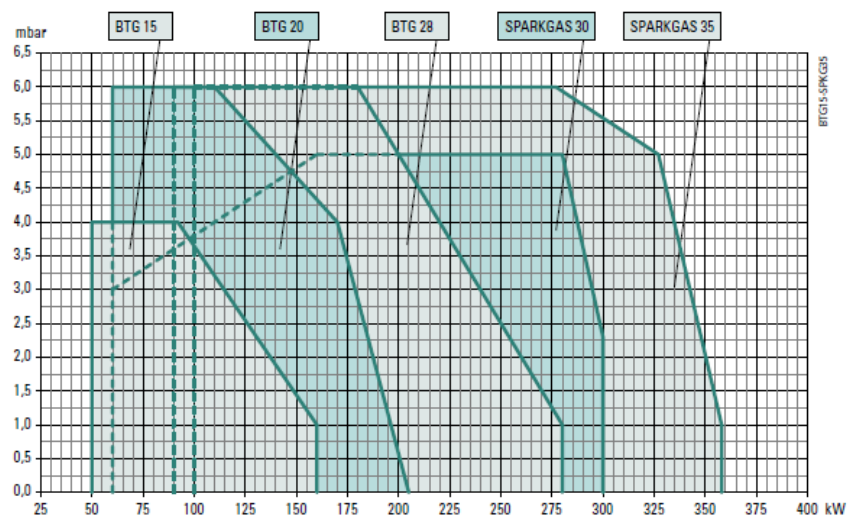
Altitud (m.s.n.m.)	Factor	Altitud (m.s.n.m.)	Factor reductor
0 - 600	1,03	2000	1,23
1000	1,08	2500	1,31
1500	1,15	3000	1,39

Fuente: Catálogo de secaderos SACMI, pág. 16

Los quemadores por lo general tienen rangos de potencia de funcionamiento, por lo que el quemador a utilizar debe tener un rango que satisfaga el requerimiento calculado.

En la siguiente figura se puede observar el rango de distintos quemadores:

Figura 31. Curvas de trabajo de Quemadores Baltur



Fuente: Catálogo de quemadores Baltur, pág. 6.

Ahora se debe calcular la cantidad de combustible que se consume, para ello utilizamos la siguiente expresión:

$$m_c = \frac{Q_q}{PCI} \quad (103)$$

Dónde:

m_c = Flujo de masa de combustible (kg/s)

Q_q = Calor generado por el quemador (kW)

PCI = Poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg)

El poder calorífico del combustible se lo puede obtener en la siguiente tabla:

TABLA 5. Poder calorífico de combustibles industriales

FUENTE	DENSIDAD	PODER CALORIFICO INFERIOR		PODER CALORIFICO SUPERIOR	
		Kg/lt	kcal/lt	kcal/kg	kcal/lt
Carbón Mineral (nacional) (*)	-	-	5.900	-	6.200
Carbón Mineral (importado)	-	-	7.200	-	7.500
Coque	-	-	6.800	-	7.500
Petróleo Crudo	0,885	8.850	10.000	9.293	10.500
Aeronaftas	0,709	7.374	10.400	8.012	11.300
Naftas	0,735	7.607	10.350	8.232	11.200
Kerosene y Comb. Jets	0,808	8.322	10.300	8.945	11.070
Gas Oil	0,845	8.619	10.200	9.211	10.900
Diesel Oil	0,880	8.800	10.000	9.416	10.700
Fuel Oil	0,945	9.261	9.800	9.923	10.500
Mezcla 70-30	0,910	8.995	9.885	9.638	10.591
Carbón Residual	1,000	-	7.600	-	7.900
Coque de Carbón Residual	-	-	7.200	-	7.800
Gas Residual de Petróleo	-	8.500/m3	-	9.000/m3	-
Gas Natural	-	8.300/m3	-	9.300/m3	-
Propano	0,508	5.588	11.000	6.102	12.013
Butano	0,567	6.180	10.900	6.735	11.878
Gas Licuado	0,537	-	10.950	6.418	11.951
Leña Blanda	-	-	1.840	-	2.940
Leña Dura	-	-	2.300	-	3.500

Fuente: <http://energia.mecon.ar/electricidad/boletines>

4.2.2 Dimensionamiento de bombas de alimentación. Para la selección de la bomba de alimentación se requieren los siguientes datos:

- Tipo de fluido a bombear
- Caudal requerido
- Altura útil efectiva

El tipo de fluido a bombear debe ser compatible con los materiales de la bomba a fin de que las propiedades de la sustancia no se alteren y además que no exista corrosión en los materiales de la bomba, para el caso de alimentos la bomba debe ser construida en acero inoxidable.

El caudal requerido es un dato proporcionado según la cantidad que se desee procesar, por lo tanto se debe calcular la altura útil efectiva para no sobredimensionar la bomba ya que de hacerlo se puede producir cavitación lo que provoca un desgaste prematuro del sistema de alimentación.

4.2.2.1 Cálculo de la altura útil efectiva. La altura útil efectiva se calcula con la siguiente fórmula:

$$H = h_s + h_d \quad (104)$$

Dónde:

H = Altura útil efectiva (m)

h_s = altura dinámica de succión (m)

h_d = altura dinámica de descarga (m)

La altura dinámica de succión es igual a:

$$h_s = h_{es} + h_{vs} + h_{rs} \quad (105)$$

Dónde:

h_{es} = Elevación estática de succión (m)

h_{vs} = cabeza de velocidad de succión (m)

h_{rs} = Pérdidas totales de energía en la succión (m)

La elevación estática de succión es la diferencia de niveles entre el nivel del líquido en el tanque de almacenamiento y el eje de la bomba, su valor es positivo si el nivel del líquido está por debajo del eje de la bomba, de lo contrario tiene un valor negativo.

La cabeza de velocidad de succión es igual a:

$$h_{vs} = \frac{v_s^2}{2g} \quad (106)$$

Dónde:

v_s = Velocidad media de succión (m/s)

g = Gravedad (9,8 m/s²)

La velocidad en la succión se puede obtener así:

$$v_s = \frac{4Q}{\pi d_s^2} \quad (107)$$

Dónde:

Q = Caudal volumétrico de la alimentación (m³/s)

d_s = Diámetro interno de la tubería (m)

El diámetro interno para tuberías de cédula 40 se muestra en el anexo D

Las pérdidas en la succión se calculan con la siguiente expresión:

$$h_{rs} = \left(\lambda_s \frac{L_s}{d_s} + \sum k \right) \frac{v_s^2}{2g} \quad (108)$$

Dónde:

λ_s = Coeficiente de fricción en la succión

L_s = Longitud de la tubería de succión (m)

d_s = Diámetro interno de la tubería (m)

k = Coeficiente de pérdida por accesorio

v_s = Velocidad media de succión (m/s)

g = Gravedad (9,8 m/s²)

El coeficiente de fricción depende del tipo de flujo, es decir si es laminar o turbulento, así:

- Para régimen laminar ($Re \leq 2000$) se utiliza la ecuación de Hagen - Poiseuille

$$\lambda_s = \frac{64}{Re} \quad (109)$$

- Para la zona crítica ($2000 < Re < 4000$) se recomienda utilizar una interpolación cúbica entre el factor para flujo laminar y flujo turbulento. La interpolación más recomendada es la cúbica propuesta por Dunlop

$$\lambda_s = \left(x_1 + R(x_2 + R(x_3 + x_4)) \right) \quad (110)$$

Dónde:

$$x_1 = 7Fa - Fb \quad (111)$$

$$x_2 = 0,128 - 17Fa + 2,5Fb \quad (112)$$

$$x_3 = -0,128 + 13Fa - 2Fb \quad (113)$$

$$x_4 = R(0,032 - 3Fa + 0,5Fb) \quad (114)$$

$$R = \frac{Re}{2000} \quad (115)$$

$$Fa = Y_3^{-2} \quad (116)$$

$$Fb = Fa \left(2 - \frac{0,00514215}{Y_2 \cdot Y_3} \right) \quad (117)$$

$$Y_2 = \frac{\varepsilon}{3,7d_s} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \quad (118)$$

$$Y_3 = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7d_s} + \frac{5,74}{4000^{0,9}} \right) \quad (119)$$

- Para régimen turbulento ($Re > 4000$) se utiliza la ecuación de Swamee y Jain

$$\lambda_s = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7d_s} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (120)$$

En todas las expresiones:

ε = Rugosidad del material de la tubería (m)

Re = Número de Reynolds

d_s = Diámetro interno de la tubería (m)

La rugosidad ε depende del tipo de material de la tubería, en el anexo E se muestra los valores para materiales comúnmente usados.

El número de Reynolds es igual a:

$$Re = \frac{\rho \cdot v_s \cdot d_s}{\mu} \quad (121)$$

Dónde:

Re = Número de Reynolds

ρ = densidad de la alimentación (kg/m³)

v_s = Velocidad media de succión (m/s)

d_s = Diámetro interno de la tubería (m)

μ = viscosidad cinemática de la alimentación (kg m/s)

El coeficiente (k) depende del tipo de accesorio y su tamaño, en el anexo F se muestra el valor para distintos tipos de accesorios utilizados comúnmente en sistemas de bombeo.

La altura dinámica de descarga es igual a:

$$h_d = h_{ed} + h_{vd} + h_{rd} \quad (122)$$

Dónde:

h_{ed} = Elevación estática de la descarga (m)

h_{vd} = cabeza de velocidad de la descarga (m)

h_{rd} = Pérdidas totales de energía en la descarga (m)

Para el cálculo de cada elemento se utiliza el mismo procedimiento que el citado para el cálculo de la altura dinámica en la succión la única diferencia es que se si el diámetro de la descarga es distinto al diámetro de la succión se debe calcular la velocidad con éste diámetro.

Ahora que se tiene los parámetros de funcionamiento de la bomba se debe seleccionar el tipo y tamaño de bomba según las curvas de funcionamiento proporcionadas por el fabricante.

En el caso de utilizar bombas destinadas a bombear agua se debe utilizar coeficientes de corrección por viscosidad para modificar los parámetros de funcionamiento en el anexo G se muestra una tabla con dichos coeficientes.

Una vez determinado los coeficientes se tiene:

$$Q' = \frac{Q}{c_q} \quad (123)$$

$$H' = \frac{H}{c_h} \quad (124)$$

Dónde:

Q' = Caudal corregido (m^3/s)

Q = Caudal volumétrico de la alimentación (m^3/s)

c_q = Coeficiente de corrección de capacidad

H' = Altura útil efectiva corregida (m)

H = Altura útil efectiva (m)

c_h = Coeficiente de corrección de altura

4.2.3 *Dimensionamiento del ventilador principal.* Para la selección del ventilador se requiere la siguiente información:

- Caudal de aire
- Presión estática
- Tipo de servicio
- Ruido
- Acople directo o por correa

El caudal de aire es el requerido para el proceso de secado el mismo fue calculado en el proceso de diseño de la cámara de secado.

4.2.3.1 *Dimensionamiento del ducto de impulsión.* Para lo ello se determina la velocidad adecuada en función del tipo de aplicación. Existen dos tipos de transmisión de aire de baja velocidad y alta velocidad asociados al ruido, pérdidas de presión, costo, etc. en general la norma ASHRAE nos proporciona las siguientes recomendaciones para los 2 sistemas:

Conductos principales de impulsión:

1. Acondicionamiento de aire para locales comerciales

Baja velocidad: entre 6 y 12 m/s

Alta velocidad; más de 12 m/s

2. Procesos en locales industriales

Baja velocidad: entre 11 y 12 m/s

Alta velocidad; entre 12 y 20 m/s

Conductos secundarios o retorno:

1. Acondicionamiento de aire para locales comerciales

Baja velocidad: entre 8 y 10 m/s

2. Acondicionamiento de aire para locales industriales

Baja velocidad: entre 10 y 12 m/s

Por lo tanto se utilizará como velocidad máxima 20 m/s, el valor de dicha velocidad dependerá de las dimensiones de los ductos, los cuáles se obtienen con la siguiente expresión:

$$d_a = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_a}{v_a}} \quad (125)$$

Dónde:

d_a = Diámetro del ducto (m)

Q_a = Caudal volumétrico de aire (m³/s)

v_a = Velocidad del aire por el conducto (m/s)

Debido al gran volumen de aire que se maneja es conveniente utilizar ductos rectangulares para ello se debe obtener las medidas del ducto rectangular equivalente, Huebscher (1948) desarrolló la relación entre conductos rectangulares y circulares que se utiliza para determinar la equivalencia de tamaño basado en el flujo de igualdad, resistencia y duración esta relación es igual a:

$$d_a = \frac{1,3(ab)^{0,625}}{(a+b)^{0,25}} \quad (126)$$

Dónde:

d_a = Diámetro del ducto (m)

a = Base del ducto rectangular equivalente (m)

b = Altura del ducto rectangular equivalente (m)

Para poder resolver la ecuación anterior es necesario determinar una relación a/b la misma se determinará en función del espacio disponible.

4.2.3.2 Cálculo de la caída de presión. La presión del sistema consta de lo siguiente:

- Caída de presión en el ducto
- Caída de presión de los accesorios

La caída de presión en el ducto se calcula con la siguiente ecuación [11]:

$$\Delta P_d = 5,38 \frac{v_a^{1,9}}{d_a^{1,22}} \cdot L_d \quad (127)$$

Dónde:

ΔP_d = Caída de presión en el ducto por metro (mmH₂O)

d_a = Diámetro del ducto (mm)

v_a = Velocidad del aire por el conducto (m/s)

L_d = Longitud del ducto de distribución de aire (m)

Ahora para calcular la caída de presión en los accesorios es necesario conocer la presión dinámica del sistema, que es igual a:

$$PD = \left(\frac{v_a}{4,043} \right)^2 \quad (128)$$

Dónde:

PD = Presión dinámica (mmH₂O)

v_a = Velocidad del aire por el conducto (m/s)

Para determinar la caída de presión en un accesorio se debe multiplicar la presión dinámica por un coeficiente K que depende del tipo y tamaño de accesorio en el anexo H se muestra varias tablas para determinar este coeficiente según la norma SMACNA, finalmente la caída de presión del sistema será igual a:

$$\Delta P_i = \Delta P_d + \sum K \cdot PD \quad (129)$$

Dónde:

ΔP_i = Caída de presión del sistema de impulsión (mm H₂O)

ΔP_d = Caída de presión en el ducto por metro (mm H₂O)

K = Coeficiente de rozamiento del accesorio

PD = Presión dinámica (mm H₂O)

Con estos valores de caudal y caída de presión del sistema se debe seleccionar un ventilador con las curvas de funcionamiento proporcionadas por el fabricante, es necesario tener en cuenta que si el ventilador no va a trabajar a nivel del mar o a temperaturas distintas a la estándar (24°C) se debe corregir el caudal y la caída de presión del sistema con unos coeficiente de corrección por altitud y/o temperatura, en el anexo I Se muestran los coeficientes de corrección.

4.2.4 Dimensionamiento del ciclón. Los ciclones generalmente tienen como parámetros de diseño el diámetro del ciclón, la caída de presión y la velocidad de entrada y velocidad de saltación en la siguiente tabla se muestran los parámetros a considerar en el diseño de ciclones con entrada tangencial.

TABLA 6. Parámetros de diseño para los ciclones de entrada tangencial.

Parámetro	Valor
Diámetro del ciclón (D)	< 1 m
Caída de presión	< 2488,16 Pa
Relación de velocidades (V_i/V_s)	< 1,35
Velocidad de entrada	15,2 – 27,4 m/s

Ahora lo primero que se debe hacer es calcular el área necesaria en la entrada del ciclón, la misma que se calcula a continuación:

$$A_c = \frac{Q_a}{v_i} \quad (130)$$

Dónde:

A_c = Área de la entrada del ciclón (m^2)

Q_a = Flujo de aire requerido en el proceso (m^3/s)

v_i = Velocidad de entrada al ciclón (m/s)

La velocidad de entrada puede estar en el rango antes mencionado, siendo muy común tomar un valor de 22 m/s.

El área es igual a:

$$A_c = a \cdot b \quad (131)$$

Reemplazando datos según la tabla 2 se tiene:

$$A_c = 0,1D^2 \quad (132)$$

Dónde:

D = Diámetro del cuerpo del ciclón (m)

Una vez calculado el diámetro del cuerpo del ciclón se calcula todas las demás dimensiones según la tabla 2.

4.2.4.1 Cálculo de la eficiencia del ciclón. Para calcular la eficiencia del ciclón se requiere calcular primero si hay o no re suspensión, ya que de presentarse re suspensión en el ciclón, la ecuación de Leith y Licht estaría sobrestimando la eficiencia del ciclón.

Para hallar la relación de velocidades se requiere primero estimar la velocidad equivalente y luego la velocidad de saltación.

La velocidad equivalente se calcula con la siguiente expresión:

$$W = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot g \cdot \mu \cdot (\rho_{ss} - \rho)}{3\rho^2}} \quad (133)$$

Dónde:

W = Velocidad equivalente (m/s)

g = Gravedad (m/s^2)

μ = Viscosidad del aire (kg/ms)

ρ_{ss} = Densidad de las partículas (kg/m^3)

ρ = Densidad del aire (kg/m^3)

La densidad y viscosidad del aire deben ser evaluadas a la temperatura del aire a la entrada del ciclón.

Ahora calculamos la velocidad de saltación:

$$v_s = \frac{4,913 \cdot W \cdot k_b^{0,4} \cdot D^{0,067} \sqrt[3]{v_i^2}}{\sqrt[3]{1 - k_b}} \quad (134)$$

Dónde:

v_s = Velocidad de saltación (m/s)

W = Velocidad equivalente (m/s)

k_b = Relación entre la base de entrada y diámetro del ciclón

D = Diámetro del cuerpo del ciclón (m)

v_i = Velocidad de entrada al ciclón (m/s)

La relación entre velocidades para evitar la resuspensión de las partículas debe ser menor a 1,35 según las condiciones de diseño.

$$\frac{v_s}{v_i} < 1,35 \quad (135)$$

Como ya estamos seguros que no hay resuspensión de las partículas, procedemos a calcular la eficiencia del ciclón. Para ello se necesita determinar el factor de configuración, el tiempo de relajación y el exponente de vórtice.

Cuando tenemos un ciclón de una familia de ciclones estandarizados, el factor de configuración G es común para cada familia de ciclones y puede leerse de la tabla 2 por lo tanto para un ciclón Stairmand de alta eficiencia:

$$G = 551,22 \quad (136)$$

El exponente de vórtice se calcula con la siguiente expresión:

$$n = 1 - (1 - 0,67D^{0,14}) \left(\frac{T}{283} \right)^{0,3} \quad (137)$$

Dónde:

n = Exponente de vórtice

D = Diámetro del cuerpo del ciclón (m)

T = Temperatura del aire a la entrada del ciclón (K)

El tiempo de relajación se calcula así:

$$T_i = \frac{\rho_{ss} \cdot D_c^2}{18\mu} \quad (138)$$

Dónde:

T_i = Tiempo de relajación (s)

ρ_{ss} = Densidad de las partículas (kg/m³)

D_c = Diámetro de las partículas (m)

μ = Viscosidad del aire (kg/ms)

$$\eta_c = 1 - e^{\left[-2 \left(\frac{G \cdot T_i \cdot m_a \cdot (n+1)}{D^3} \right)^{\frac{0.5}{n+1}} \right]} \quad (139)$$

Dónde:

η_c = Eficiencia del ciclón

T_i = Tiempo de relajación (s)

m_a = Flujo de aire requerido en el proceso (m³/s)

n = Exponente de vórtice

D = Diámetro del cuerpo del ciclón (m)

4.2.4.2 Cálculo de la caída de presión del ciclón. La caída de presión es un parámetro importante debido a que relaciona directamente los costos de operación. La caída de presión en un ciclón puede deberse a las pérdidas a la entrada y salida, y pérdidas de energía cinética y fricción en el ciclón.

Las eficiencias de remoción en un ciclón se pueden aumentar al incrementar las velocidades de entrada, pero esto también incrementa las caídas de presión. A mayor pérdida de presión aumentan los requerimientos de potencia en el ventilador y por lo tanto mayor consumo de energía.

Existen diferentes ecuaciones para calcular la pérdida de presión en un ciclón. Las pérdidas de presión menores a 2488.16 pascales (10 in H₂O) son generalmente aceptadas.

Una de las ecuaciones para calcular la pérdida de presión en un ciclón es la desarrollada por Shepherd y Lapple.

$$\Delta P_c = \frac{1}{2} \rho \cdot v_i^2 \cdot N_H \quad (140)$$

Dónde:

ΔP_c = Caída de presión en el ciclón (Pa).

ρ = Densidad del gas portador (kg/m³).

v_i = Velocidad de entrada del aire en el ciclón (m/s).

N_H = Número de cabezas de velocidad a la entrada del ciclón.

El número de cabezas de velocidad a la entrada del ciclón es común para cada familia de ciclones estandarizados, para ciclones de alta eficiencia tipo Stairmand según la tabla 2 es igual a:

$$N_H = 6,4 \quad (141)$$

4.2.5 Selección del ventilador de extracción. La selección del ventilador de extracción se la realiza siguiendo los mismos pasos que en la sección 4.2.3. con la diferencia es que los ductos serán de forma circular ya que el espacio no es un inconveniente, además en la caída de presión del sistema de extracción se debe aumentar la caída de presión producida por el ciclón, así:

$$\Delta P_i = \Delta P_d + \Delta P_c + \sum K \cdot PD \quad (142)$$

Dónde:

ΔP_i = Caída de presión del sistema de impulsión (mmH₂O)

ΔP_d = Caída de presión en el ducto por metro (mmH₂O)

ΔP_c = Caída de presión en el ciclón (mmH₂O).

K = Coeficiente de rozamiento del accesorio

PD = Presión dinámica (mmH₂O)

CAPÍTULO V

5. DISEÑO DEL SOFTWARE DE ESTANDARIZACIÓN DE SECADEROS POR ASPERSIÓN

5.1 Diseño de software de estandarización

El software de estandarización tiene por objeto dimensionar el tamaño de la cámara de secado para una sustancia determinada y un flujo máximo, además de proporcionar los parámetros necesarios para la selección de los equipos requeridos en el proceso de secado por aspersión.

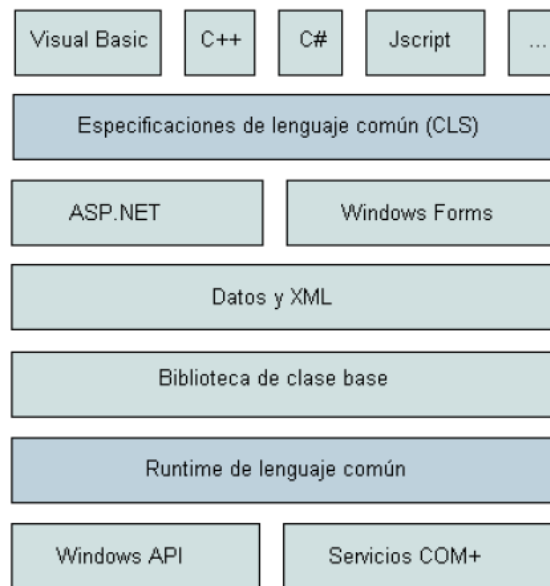
Una vez seleccionados los equipos el software podrá determinar el costo del proyecto, proporcionando toda la información necesaria para la instalación de un secadero por aspersión para una determinada sustancia.

5.1.1 Consideraciones iniciales. El software se ha programado en el lenguaje de programación Visual Basic.Net incorporado en Microsoft Visual Studio 2010.

Visual Basic .NET usa una jerarquía de clases que están incluidas en el .NET Framework, .NET es una nueva filosofía en cuanto a entornos de desarrollo.

Este entorno puede utilizar varios lenguajes diferentes para escribir programas y todos se apoyarán en las herramientas que ofrece para conseguir aplicaciones, en la figura 32 se muestra la estructura del .NET Framework.

Figura 32. Estructura de la plataforma .NET Framework



Fuente: Introducción a la tecnología .NET, ADR infor SL, pág. 5.

.Net Framework permite el desarrollo de aplicaciones a través del uso de un conjunto de herramientas y servicios que proporciona y que se agrupan en tres bloques:

- El entorno de ejecución común ó Common Language Runtime (CLR)
- Jerarquía de clases de .NET
- Motor de generación de formularios, para crear nuestras aplicaciones

Las aplicaciones de escritorio son aquellas basadas en ventanas y controles comunes de Windows que se ejecutan en el sistema local. Son el mismo tipo de aplicaciones que antes se construían con Visual Basic 6 u otros entornos similares.

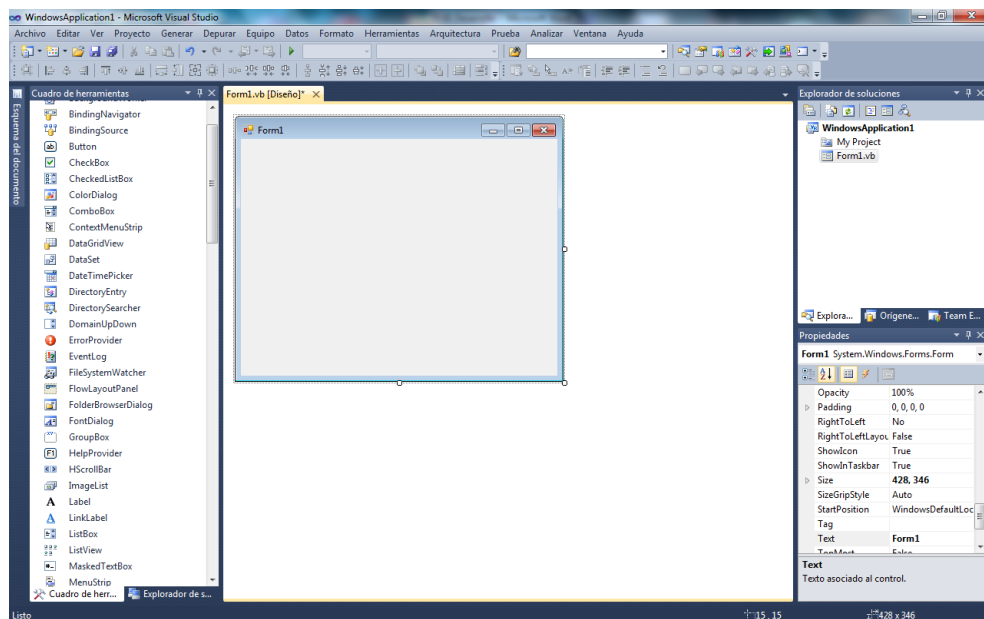
En la plataforma .NET, el espacio de nombres que ofrece las clases necesarias para construir aplicaciones de escritorio bajo Windows se denomina Windows Forms. Este es también el nombre genérico que se le otorga ahora a este tipo de programas basados en ventanas.

Windows Forms está constituido por multitud de clases especializadas que ofrecen funcionalidades para el trabajo con ventanas, botones, rejillas, campos de texto y todo este tipo de controles habituales en las aplicaciones de escritorio.

Visual Studio ofrece todo lo necesario para crear visualmente este tipo de programas, de un modo similar aunque más rico al que ofrecía el entorno de desarrollo integrado de Visual Basic.

En la siguiente gráfica se muestra el diseñador de interfaces de aplicaciones de escritorio con Windows Forms en Visual Studio.

Figura 33. Diseñador de interfaces de aplicaciones en Visual Studio



5.1.2 Desarrollo del entorno de ingreso de datos. En el ingreso de datos requeridos para el diseño del secadero por aspersión se ha dividido en 3 aspectos:

- Ubicación del secadero
- Sustancia a secar
- Detalles del atomizador

Cada una de estas opciones se puede escoger en el formulario general de ingreso de datos, que se muestra en la figura 34.

Figura 34. Formulario general de ingreso de datos



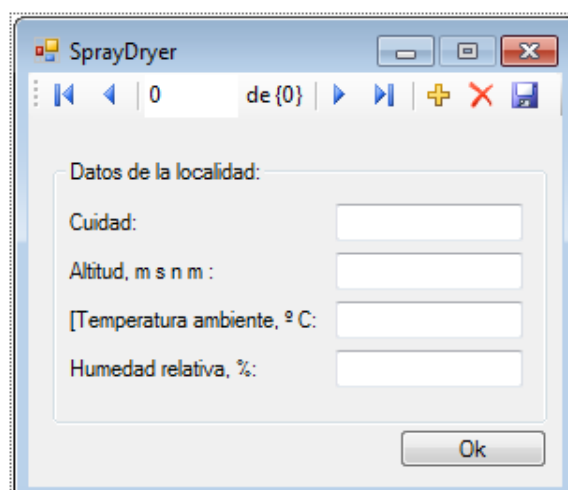
A continuación se muestra los datos requeridos:

1.- Ubicación del secadero.- Se refiere a las características de la ciudad en donde se va a instalar el secadero los datos requeridos son:

- Nombre de la ciudad: Variable tipo String
- Altura (m.s.n.m.): Variable tipo Double
- Temperatura ambiente (°C): Variable tipo Double
- Humedad relativa (%): Variable tipo Double

En la figura 35 se muestra el formulario de ingreso de datos de la localidad.

Figura 35 Formulario de ingreso de datos de la localidad



Los datos ingresados en este formulario se pueden almacenar en una base de datos para su posterior utilización, por defecto se han incorporado los datos correspondientes a las ciudades de: Quito, Guayaquil y Riobamba.

2.- Sustancia a secar.- Se debe ingresar las propiedades de la sustancia a secar, además de las características para el secado del producto seleccionado, los datos requeridos son:

Producto a secar

- | | |
|---|----------------------|
| - Nombre del producto: | Variable tipo String |
| - Flujo de alimentación (kg/h): | Variable tipo Double |
| - Concentración de sólidos (%): | Variable tipo Double |
| - Humedad final del producto (kgw/kgs): | Variable tipo Double |

Datos de la alimentación

- | | |
|----------------------------------|----------------------|
| - Densidad (kg/m ³): | Variable tipo Double |
| - Viscosidad (P): | Variable tipo Double |

Datos del sólido seco

- | | |
|----------------------------------|----------------------|
| - Densidad (kg/m ³): | Variable tipo Double |
| - Calor específico (J/kss.K): | Variable tipo Double |

Temperaturas de secado

- | | |
|---|----------------------|
| - Temperatura del aire a la entrada (°C): | Variable tipo Double |
| - Temperatura del aire a la salida (°C): | Variable tipo Double |
| - Temperatura de la alimentación (°C): | Variable tipo Double |

En la figura 36 se muestra el formulario de ingreso de datos del producto a secar.

Figura 36. Formulario de ingreso de datos del producto a secar

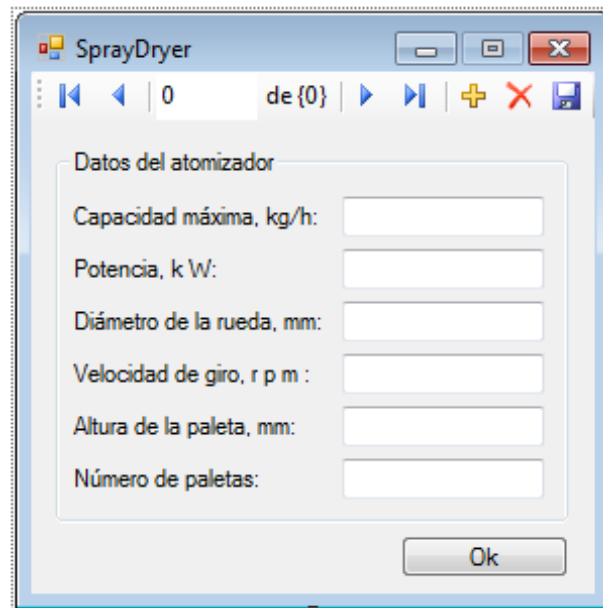
Los datos ingresados en este formulario se pueden almacenar en una base de datos para su posterior utilización, por defecto se han incorporado los datos correspondientes a las sustancias: Maltodextrina, pasta cerámica (barbotina).

3.- Detalles del atomizador.- Como se expuso en el capítulo anterior para el diseño del secadero es necesario tener las características dimensionales del atomizador a utilizar, los datos requeridos son:

- | | |
|-------------------------------|----------------------|
| - Capacidad máxima (kg/h): | Variable tipo Double |
| - Potencia (kW): | Variable tipo Double |
| - Diámetro de la rueda (mm): | Variable tipo Double |
| - Velocidad de giro (r.p.m.): | Variable tipo Double |
| - Altura de las paletas (mm): | Variable tipo Double |
| - Número de las paletas: | Variable tipo Double |

En la figura 37 se muestra el formulario de ingreso de datos del atomizador.

Figura 37. Formulario de ingreso de datos del atomizador.

The image shows a software window titled 'SprayDryer'. At the top, there is a navigation bar with several icons: a double left arrow, a single left arrow, a text box containing '0', the text 'de {0}', a single right arrow, a double right arrow, a plus sign, a minus sign, and a document icon. Below this bar, the main area is titled 'Datos del atomizador'. It contains six input fields, each with a label to its left: 'Capacidad máxima, kg/h:', 'Potencia, kW:', 'Diámetro de la rueda, mm:', 'Velocidad de giro, rpm:', 'Altura de la paleta, mm:', and 'Número de paletas:'. Each label is followed by an empty rectangular text box. At the bottom right of the window, there is an 'Ok' button.

Los datos ingresados en este formulario se pueden almacenar en una base de datos para su posterior utilización, por defecto se han incorporado los datos correspondientes a los discos atomizadores de la marca SIMES para una capacidad de 100 a 900 kg/h.

Una vez que todos los datos sean ingresados se activará el botón “Siguiente” del formulario general de ingreso de datos, y así continuar con el proceso de diseño del secadero por aspersión, en el anexo J se muestra el código fuente para el dimensionamiento de la cámara de secado.

5.1.3 Desarrollo del entorno de dimensionamiento de la cámara de secado y equipos auxiliares. Una vez que todos los datos han sido ingresados se puede mostrar el formulario de dimensionamiento de equipos, al cargarse este formulario se mostrará las dimensiones de la cámara de secado, las cuales servirán de referencia para la selección de los equipos, en la figura 38 se muestra el formulario de dimensionamiento de equipos cuando se carga.

Figura 38. Formulario de dimensionamiento de equipos

Como se observa en la figura 38 en el formulario en la parte izquierda se muestra las opciones para determinar los requerimientos de los siguientes equipos:

- Características del ventilador y calefactor
- Características de bombas de alimentación
- Dimensionamiento del ciclón
- Características del ventilador de extracción.

A continuación se detalla cada uno de los parámetros a considerar en cada equipo.

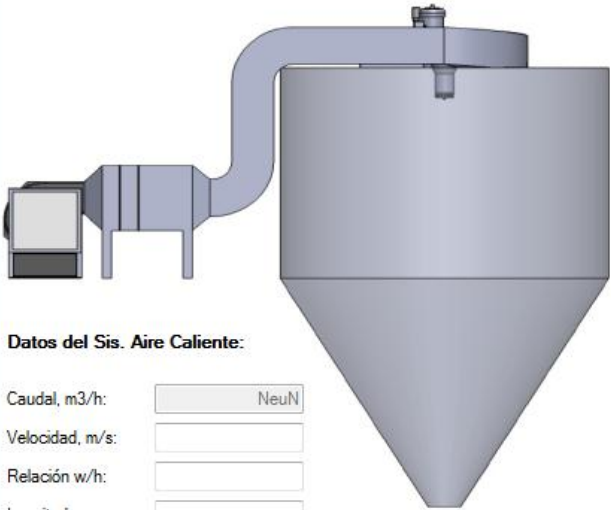
5.1.3.1 Características del ventilador y calefactor. Para determinar las características del ventilador son necesarios los siguientes datos:

- Caudal (m^3/h)

- Velocidad del aire en el ducto (m/s)
- Relación de forma del ducto
- Longitud del ducto

Estos valores se muestran en la figura 39 y son calculados en función del tamaño de la cámara, el caudal al ser un requerimiento para el proceso de secado no se puede modificar, los demás valores pueden variar en función de la instalación.

Figura 39. Entrada de datos ventilador principal y calefactor



Datos del Sis. Aire Caliente:

Caudal, m ³ /h:	<input type="text" value="NeuN"/>
Velocidad, m/s:	<input type="text"/>
Relación w/h:	<input type="text"/>
Longitud, m:	<input type="text"/>
Calefacción:	<input type="text" value="Sel. combustible"/>

Debido a que los datos requeridos para determinar la potencia del calefactor ya son ingresados con anterioridad, el único requerimiento que falta es el tipo de combustible a utilizar.

Una vez que todos los datos han sido revisados se activará la opción de ver características del ventilador principal y calefactor, proporcionando los datos necesarios para la selección de estos equipos, dichos datos son:

Características del ventilador principal

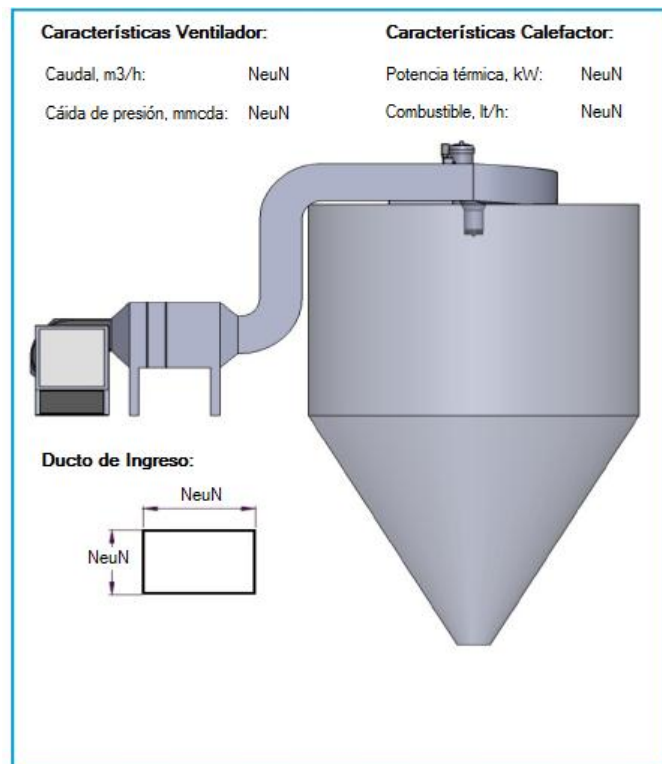
- Caudal (m^3/h)
- Caída de presión (mmH_2O)

Características del calefactor

- Potencia térmica (kW)
- Consumo de combustible (lt/h)

Dichos valores y las dimensiones del ducto de ingreso de aire se presentan en la figura 40, en el anexo K se muestra el código fuente para calcular dichas propiedades.

Figura 40. Características del ventilador principal y calefactor



5.1.3.2 Características de la bomba de alimentación. Para determinar las características de la bomba de alimentación son necesarios los siguientes datos:

- Flujo (m^3/h)
- Material de la tubería
- Diámetro interno de la tubería
- Longitud de la tubería

La tubería debe diferenciarse entre los valores para la succión y la descarga, por defecto el programa presenta los datos idóneos en función del tamaño de la cámara de secado, los mismo que se pueden cambiar según el tipo de instalación a excepción del flujo el cual es un requerimiento fijo.

Figura 41. Entrada de datos de la bomba de alimentación

Datos del Sistema de Bombeo:

Flujo, m^3/h :

Seleccione el material de la tubería: ▼

Datos de la succión:

D. de succión, mm:

Altura Est. succión, m:

L. tubería succión, m:

Datos de la descarga:

D. de descarga, mm:

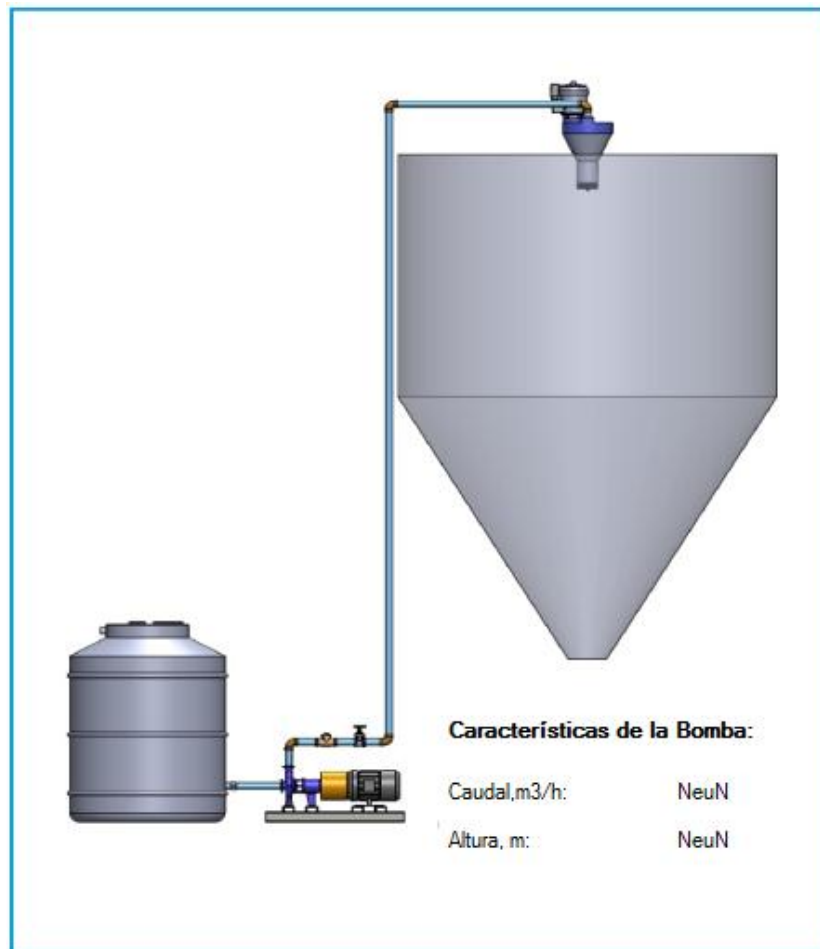
Altura Est. descarga, m:

L. tubería descarga, m:

The diagram shows a pump system with a cylindrical tank on the left, a pump unit, and a vertical pipe leading to a large conical hopper on the right. The pump is connected to the tank via a horizontal pipe and to the hopper via a vertical pipe.

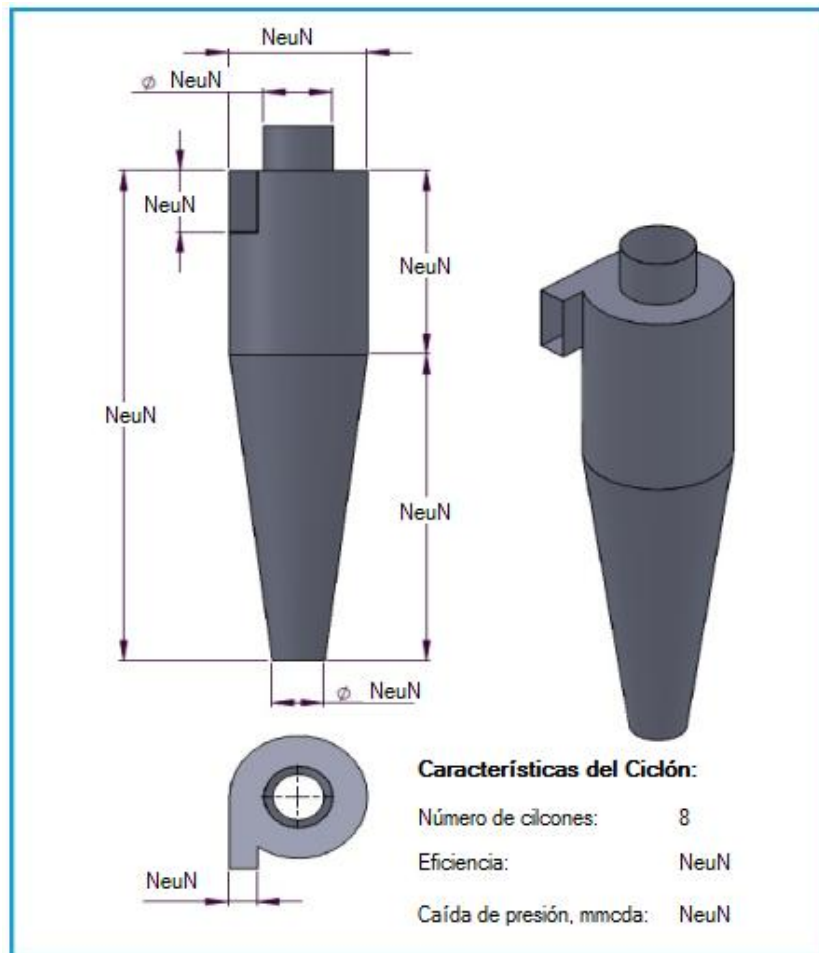
Una vez que se haya revisado el ingreso de datos para el dimensionamiento de la bomba de alimentación se pueden revisar las características de la bomba para su selección, en la figura 42 se presenta las características calculadas, en el anexo L se muestra el código fuente para el dimensionamiento de la bomba de alimentación.

Figura 42. Características de la bomba de alimentación



5.1.3.3 Dimensionamiento del ciclón. Para el dimensionamiento del ciclón se requiere la velocidad de entrada y el caudal, como éste último es un valor fijo solo se puede variar la velocidad de entrada procurando que ésta se encuentre en los valores recomendados, el tipo de ciclón que se ha considerado es de alta eficiencia tipo Stairmand, en la figura 43 se presenta las dimensiones la caída de presión y la eficiencia del ciclón, en el anexo M se muestra el código fuente para el dimensionamiento del ciclón.

Figura 43. Dimensionamiento del ciclón



5.1.3.4 Características del ventilador de extracción. Para determinar las características del ventilador de extracción son necesarios los siguientes datos:

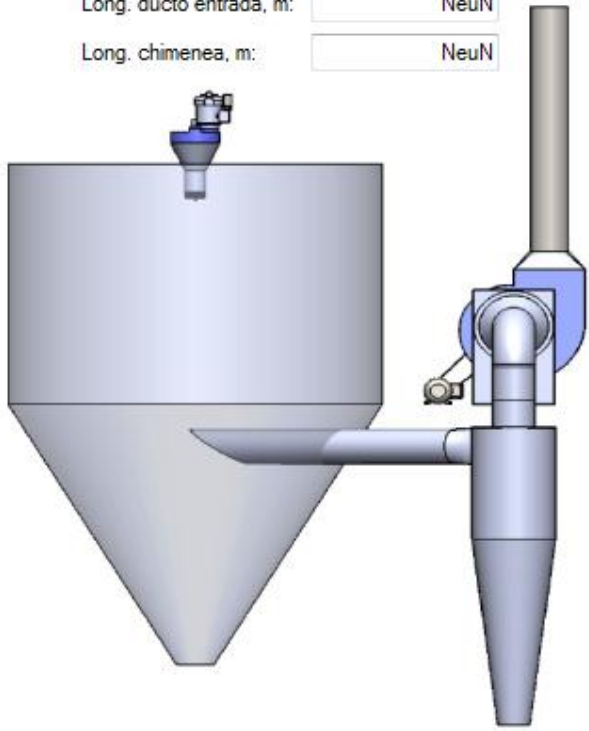
- Caudal (m^3/h)
- Velocidad del aire en el ducto (m/s)
- Longitud del ducto de entrada (m)
- Longitud de la chimenea (m)

Estos valores se muestran en la figura 44 y son calculados en función del tamaño de la cámara, el caudal al ser un requerimiento para el proceso de secado no se puede modificar, los demás valores pueden variar en función de la instalación.

Figura 44. Entrada de datos ventilador de extracción

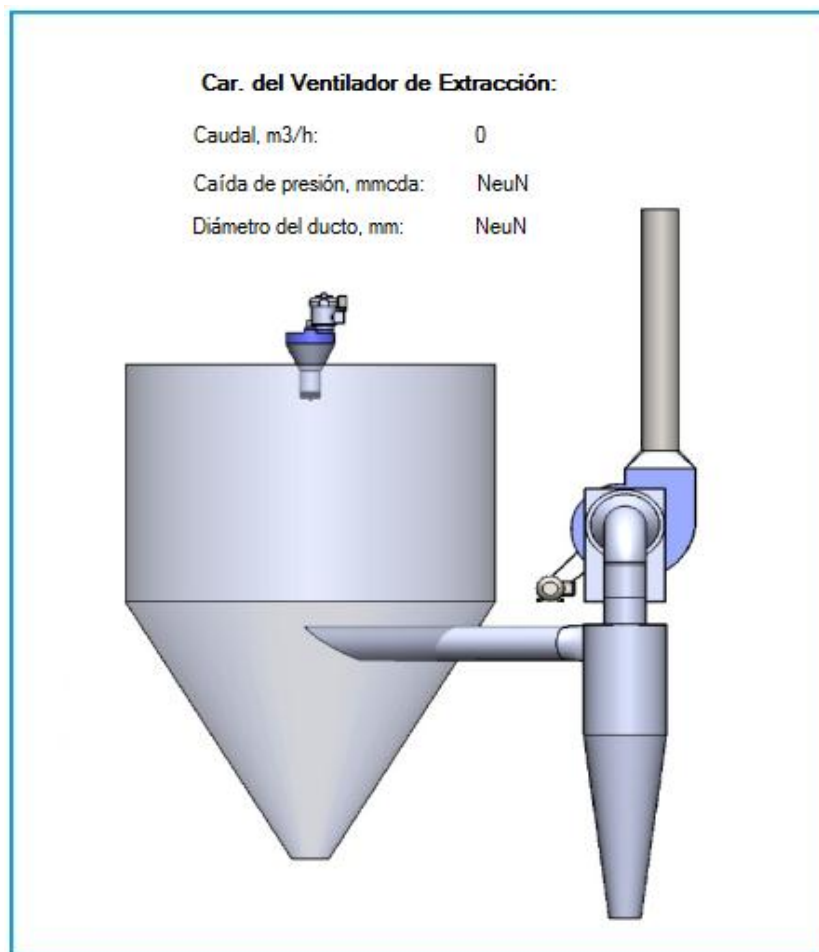
Datos del Sistema de Extracción:

Caudal, m ³ /h:	<input type="text" value="NeuN"/>
Velocidad, m/s:	<input type="text" value="0"/>
Long. ducto entrada, m:	<input type="text" value="NeuN"/>
Long. chimenea, m:	<input type="text" value="NeuN"/>



Una vez que todos los datos han sido revisados se activará la opción de ver características del ventilador de extracción, proporcionando los datos necesarios para la selección, dichos valores se presentan en la figura 45, en el anexo N se muestra el código fuente para calcular dichas propiedades.

Figura 45. Características del ventilador de extracción



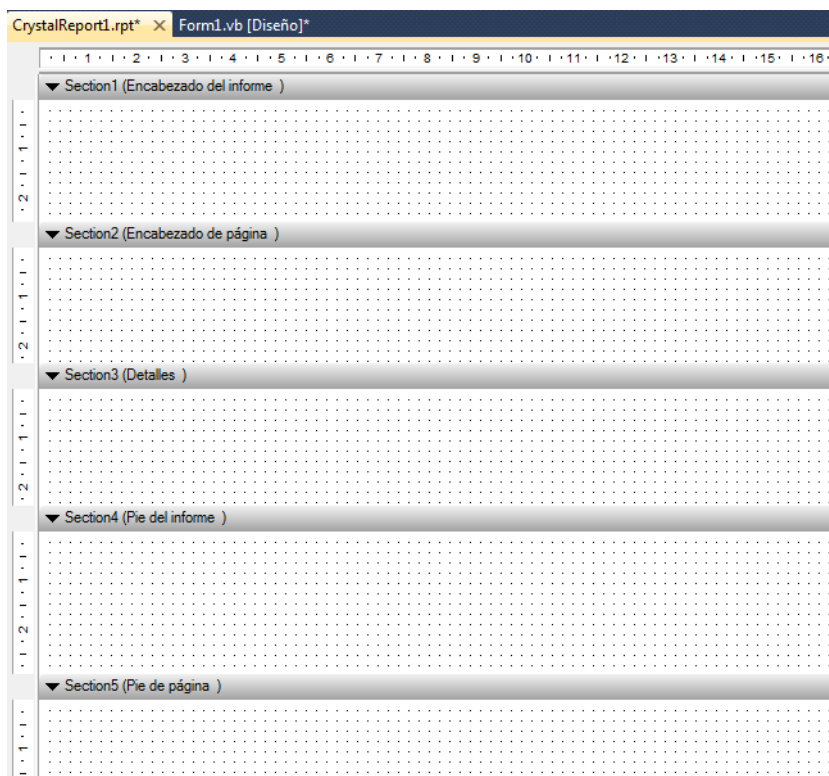
5.1.4 Desarrollo del entorno de salida de datos. Una vez se ha determinado todos los parámetros para el desarrollo del secadero por aspersión estos valores se podrán guardar, imprimir o exportar a diversos tipos de archivos como .pdf, .doc, .xls, para lo cual se ha optado por utilizar “Crystal Reports”.

Es una herramienta especializada en la generación de informes para el entorno Windows, que mediante un conjunto de diseñadores y asistentes nos permite la creación de los listados para nuestras aplicaciones, el mismo se instala como un complemento en el entorno de programación.

El reporte está orientado a mostrar tablas de una base de datos, debido a que los cálculos del secadero por aspersión no se almacenan en una base de datos se deben definir campos de parámetro para poder exportar los valores desde los formularios hacia el reporte.

Al agregar un nuevo reporte al proyecto en Visual Studio 2010 tiene el aspecto que muestra la figura 46.

Figura 46. Diseñador de informes de Crystal Reports



Como se puede apreciar un informe consta de una serie de secciones, dentro de las cuales se organiza la información. Las secciones básicas que encontraremos habitualmente en todo informe serán las siguientes:

- **Encabezado del informe.** Esta sección se imprime una vez al comienzo de la ejecución del informe, siendo adecuada para insertar en ella información general como título, autor, imágenes, gráficos, etc.

- **Encabezado de página.** Esta sección se imprime una vez por cada página del informe, y en ella podemos situar los títulos de las columnas de los campos de la tabla a imprimir, la fecha del listado, etc.

- **Detalles.** Es la sección más importante, y en ella se sitúan los campos que se requiere imprimir los cuales mostrarán todos los datos requeridos para el desarrollo del secadero por aspersión.

- **Pie del informe.** Se imprime una vez al final del informe, siendo una sección propicia para insertar variables requeridas al final del informe.

- **Pie de página.** Se imprime una vez por página, justamente después de las líneas de detalle. Se trata de una sección muy adecuada para incluir números de página, líneas separadoras, etc.

5.1.5 Instalación del software SprayDryer. Una vez se haya depurado y compilado correctamente el software es necesario crear un archivo instalador para su distribución en otras computadoras, para ello se siguen los siguientes pasos:

1.- Generar un archivo ejecutable. Una vez finalizado el proyecto, crearemos una versión reléase del proyecto y lo volveremos a probar y depurar. Esto compila los diversos archivos que constituyen el programa en un archivo ejecutable aislado denominado ensamblado.

2.- Crear una aplicación de instalación. Para ejecutar nuestra aplicación, normalmente el usuario necesita otros archivos, como cualquier archivo DLL (dynamic-link library) que hayamos utilizado para crear nuestra aplicación.

Visual Basic .NET proporciona el asistente para proyectos de instalación que automatiza la creación del programa de instalación y garantiza que el usuario tiene todos los archivos necesarios.

5.1.5.1 Requisitos para la instalación. Para la correcta instalación del software el computador debe cumplir con los siguientes requisitos de hardware y software, los mismos que se mencionan a continuación:

- Requisitos de hardware

- PC con procesador Pentium IV de 1,3 GHZ o superior.
- 512 MB de memoria RAM.
- 500 MB de espacio disponible en el disco duro.
- Unidad de CD-ROM
- Pantalla SVGA (1024 x 768 pixeles) o de mayor resolución, compatible con Microsoft Windows.
- Teclado y Mouse (ratón) u otro dispositivo de puntero.

- Requisitos de software

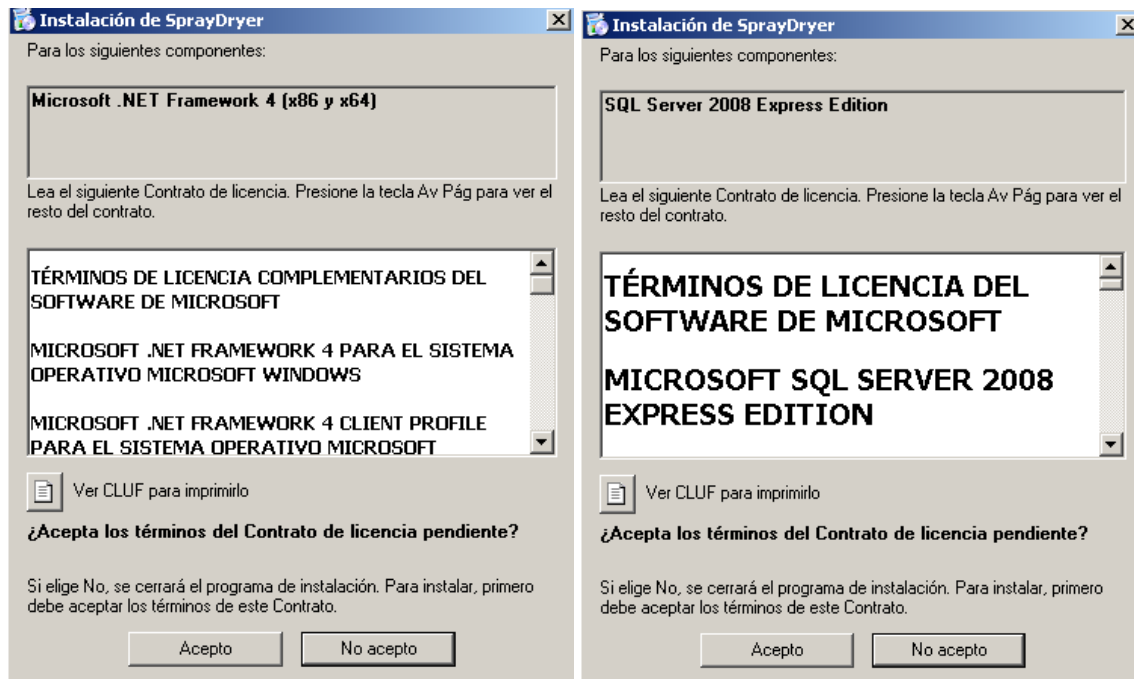
- Sistema Operativo Microsoft Windows XP Service Pack, Windows Vista o Windows 7
- Microsoft .NET Framework SDK v.4.0.
- Microsoft SQL Server 2008.
- Adobe Reader PDF
- Equipo de impresión.

Debido a que no todas las computadoras cuentan con todos los requisitos de software, en el paquete de instalación se ha incluido todas las herramientas necesarias para la instalación del programa.

5.1.5.2 *Guía de instalación.* Para la instalación del software se deben seguir los siguientes pasos:

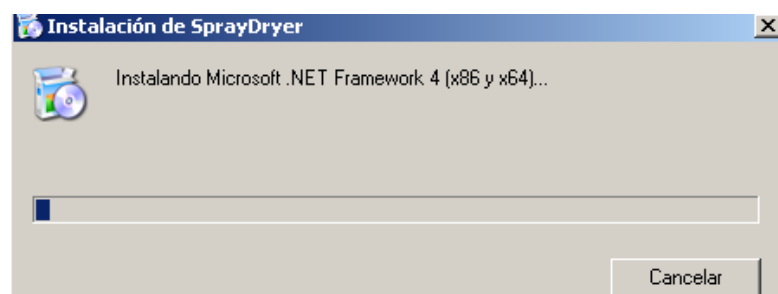
1.- En la carpeta SprayDryer dar doble click sobre el icono setup.exe, si su ordenador no posee los requisitos, éstos se instalarán primero, para ello acepte los contratos de licencia de .NET Framework 4.0 y SQL Server 2008.

Figura 47. Contrato de licencia de .NET 4.0 y SQL Sever 2008



2.- Una vez aceptado los contratos de licencia se iniciará la instalación de .NET Framework 4.0.

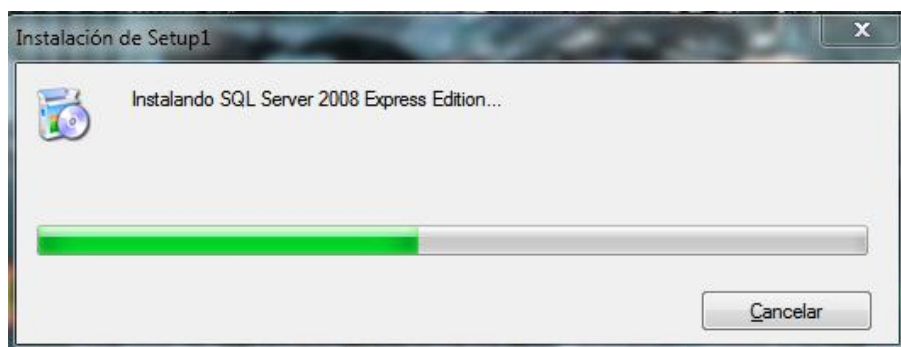
Figura 48. Instalación de .NET Framework 4.0



Al finalizar se le solicitará que reinicie el computador una vez se reinicie se debe esperar hasta que Windows configure la instalación.

3.- Reiniciada la computadora automáticamente se continua con la instalación de SQL Server 2008.

Figura 49. Instalación de SQL Server 2008



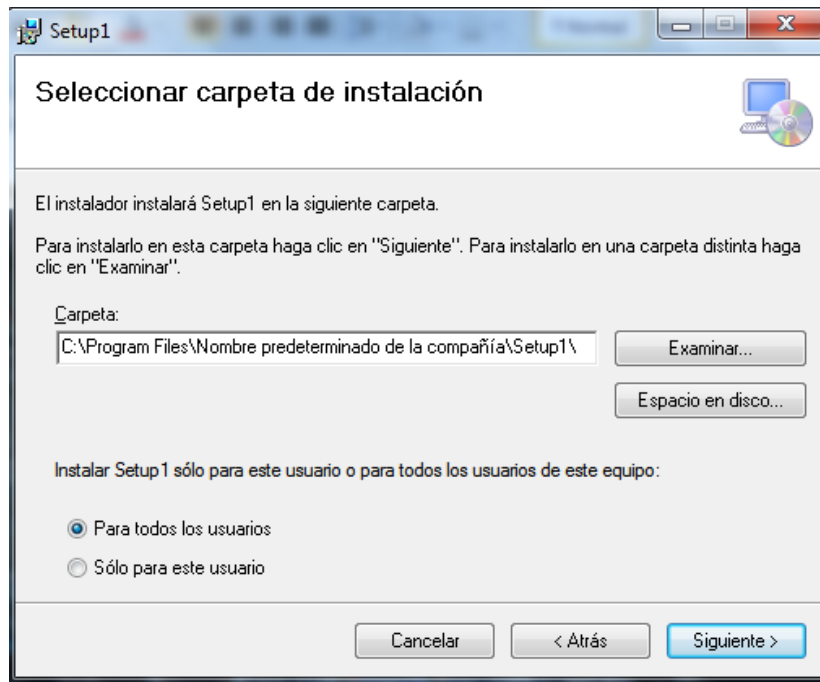
4.- Instalados los requisitos se inicia la instalación del software SprayDryer, para ello se debe dar click en "Siguiente".

Figura 50. Instalación del software SprayDryer



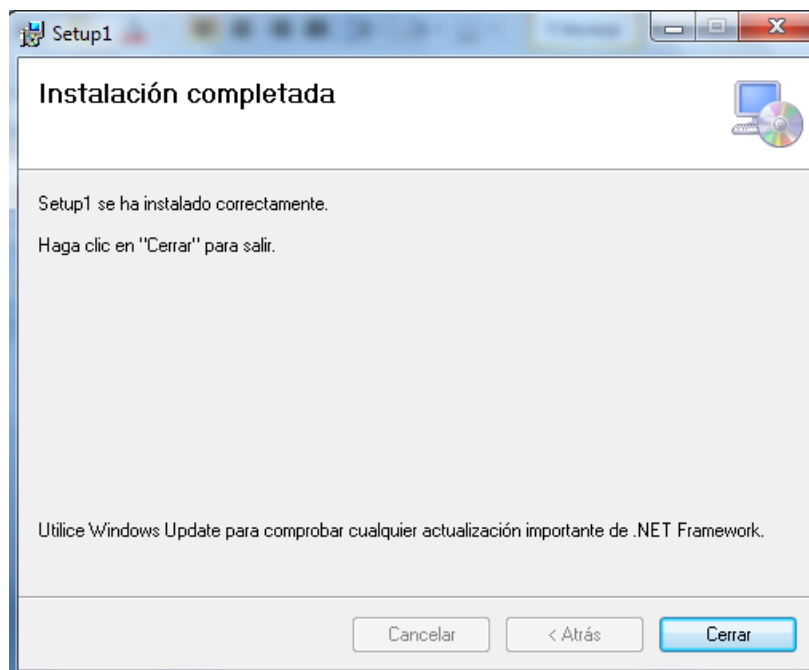
5.- Luego se debe escoger la dirección para la instalación del software, por defecto se instala en el disco C:\Program Files\ESPOCH-EIM\SprayDryer.

Figura 51. Directorio de instalación del software SprayDryer



6.- Una vez copiados todos los archivos se finaliza la instalación, para ello se debe dar click en “Cerrar”.

Figura 52. Instalación completada del software SprayDryer



5.2 Análisis de costos

En el formulario de dimensionamiento de equipos también se encuentra la opción análisis de costos, cuando se activa esta opción permite al usuario introducir los valores de los precios de los equipos, materiales y mano de obra necesarios para el desarrollo del proyecto, la figura 5.22 muestra el formulario de ingreso de costos.

Una vez que se introducen el precios de los equipos, materiales y mano de obra el software calcula la cantidad necesaria de materiales para la elaboración del proyecto en función del tamaño de la cámara de secado y equipos auxiliares.

Figura 53. Formulario de ingreso de costos

Equipos:	
Atomizador:	<input type="text"/>
Ventilador Principal:	<input type="text"/>
Calefactor:	<input type="text"/>
Bomba de Alimentación:	<input type="text"/>
Ciclón:	<input type="text"/>
Ventilador de Extracción:	<input type="text"/>

Mano de obra:	
Ing. Mecánico:	<input type="text"/>
Mecánico Soldador:	<input type="text"/>
Soldador:	<input type="text"/>
Pintor:	<input type="text"/>
Ayudante:	<input type="text"/>

Materiales:	
Plancha de acero inoxidable:	<input type="text"/>
Plancha de acero galvanizado:	<input type="text"/>
Perfil estructural:	<input type="text"/>
Filtro de aire:	<input type="text"/>
Reservorio:	<input type="text"/>
Tubería de succión:	<input type="text"/>
Tubería de descarga:	<input type="text"/>
Válvula de compuerta:	<input type="text"/>
Válvula check:	<input type="text"/>
Codo 90°:	<input type="text"/>
Electrodo:	<input type="text"/>
Disco de corte:	<input type="text"/>

Ok

Los costos de un proyecto se componen de:

- Costos directos
- Costos indirectos
- Imprevistos

En la tabla 7 se muestra la presentación de los costos totales para la instalación del secadero por aspersión.

TABLA 7. Presentación de costos totales

DESCRIPCIÓN	COSTO USD
COSTOS DIRECTOS	
COSTOS INDIRECTOS	
Imprevistos (2%)	
COSTO TOTAL DEL PROYECTO	

A continuación se detalla la composición de cada uno de los costos antes mencionados.

5.2.1 Costos directos. Son aquellos que pueden identificarse directamente con un objeto de costos, sin necesidad de ningún tipo de reparto. Los costos directos se derivan de la existencia de aquello cuyo costo se trata de determinar, sea un producto, un servicio, una actividad, como por ejemplo, los materiales directos y la mano de obra directa destinados a la fabricación de un producto, o los gastos de publicidad efectuados directamente para promocionar los productos en un territorio particular de ventas.

Los costos directos se dividen en:

1. Equipo
2. Materiales
3. Mano de obra
4. Transporte

En la tabla 8 se muestra la presentación de los costos de equipos.

TABLA 8. Presentación de costo de equipos

ITEM	DESCRIPCION	MEDIDA	CANT	COSTO UNITARIO USD	COSTO TOTAL USD
1	Atomizador	UND	1		
2	Ventilador principal	UND	1		
3	Calefactor	UND	1		
4	Bomba de alimentación	UND	1		
5	Ciclón	UND			
6	Ventilador de extracción	UND	1		
COSTO TOTAL DE EQUIPOS					
IVA					
COSTO TOTAL DE EQUIPOS					

Para analizar el costo por materiales podemos considerar a los mismos como bienes tangibles, y con la posibilidad de ser almacenables, con la finalidad de utilizarlos en el proceso productivo para la obtención de productos, o bien, para el mantenimiento de los equipos. Por lo tanto se debe considerar los materiales requeridos para la construcción de los siguientes componentes:

- Cámara de secado
- Ducto de ingreso de aire caliente(Ducto y codos)
- Ducto de salida (Ducto, codos y transición)
- Estructura
- Chimenea (Ducto y reducción)
- Materiales necesarios para el sistema de alimentación(Ducto, accesorios y válvulas)

En la tabla 9 se muestra la presentación de los costos de materiales.

TABLA 9. Presentación de costo de equipos

ITEM	DESCRIPCION	MEDIDA	CANT	COSTO UNITARIO USD	COSTO TOTAL USD
1	Plancha de acero inoxidable	UND			
2	Plancha de acero galvanizado	UND			
3	Perfil estructural	UND			
4	Filtro de aire	UND			
5	Reservorio	UND			
6	Tubería de succión	UND			
7	Tubería de descarga	UND			
8	Válvula de compuerta	UND			
9	Válvula check	UND			
10	Codo 90°	UND			
11	Electrodos	lbs			
12	Disco de corte	UND			
COSTO TOTAL DE EQUIPOS					
IVA					
COSTO TOTAL DE EQUIPOS					

El coste de mano de obra o coste de personal se puede definir como la retribución total del esfuerzo humano aplicado al proceso de producción, para la construcción del secadero se ha formado un equipo de trabajo, el cual se muestra en la tabla 10.

TABLA 10. Presentación de costo de mano de obra

PERSONAL	COSTO POR HORA (USD)	HORAS DE TRABAJO	COSTO TOTAL DE LA OBRA (USD)
Ingeniero Mecánico			
Mecánico - Soldador			
Soldador			
Pintor			
Ayudante			
COSTO TOTAL DE LA MANO DE OBRA			

Los precios de los servicios de transporte carretero de carga no son un dato recabado de manera sistemática por las estadísticas oficiales o por organismos o entidades relacionadas con la actividad. En la tabla 11 se muestra la presentación de los costos directos.

TABLA 11. Presentación de costos directos

DESCRIPCIÓN	COSTO TOTAL DIRECTO USD
Equipos	
Materiales	
Mano de obra	
Transporte	
TOTAL	

5.2.2 Costos indirectos. Son aquellos costos cuya identificación con un objeto de costos específico es muy difícil, o no vale la pena realizarla. Para imputar los costos indirectos a los distintos departamentos, productos o actividades, es necesario, normalmente, recurrir a algún tipo de mecanismo de asignación, distribución o reparto. Los costos comunes a varios productos, o costos conjuntos, reciben también el tratamiento de costos indirectos.

5.3 Validación del software

Para verificar que el software elaborado ofrece resultados confiables, a continuación se compara con un secadero por aspersión marca SACMI modelo ATM 12 que se encuentra instalado y operando en la empresa ECUACERÁMICA ubicada en la ciudad de Riobamba, para ello se tiene los siguientes datos:

- Sustancia a secar: Pasta cerámica(Barbotina)
- Capacidad: 4740 kg/h
- Producción: 3500 kg/h
- Capacidad evaporativa: 1200 lt/h

Se realizará un análisis en la ciudad de Guayaquil y Riobamba en la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos, en el anexo O se muestra las características del secadero comercial ATM 12.

TABLA 12. Comparación de resultados con secadero ATM 12

	Secadero ATM 12	SprayDryer Guayaquil	SprayDryer Riobamba
Flujo de alimentación (kg/h)	4740	4740	4740
Producción (kg/h)	3500	3500,49	3500,49
Capacidad evaporativa (lt/h)	1200	1225,17	1225,17
Temperatura de entrada (°C)	400 - 600	400	400
Temperatura de salida (°C)	70 - 120	90	90
Caudal de aire (m³/h)	12000	8701,91	12135,38
Potencia térmica (kW)	1220	1112,14	1580,95
Diámetro de la cámara (mm)	5100	4682	5014
Número de ciclones	1	2	2

Se observa que los valores no difieren más allá del 10%, por lo que se acepta que el software elaborado ofrece resultados confiables, además que se tiene un ahorro energético y de espacio en la instalación.

Se aprecia que a medida que el lugar de la instalación aumenta en altitud, también aumentan los parámetros como diámetro de la cámara de secado, aire requerido y potencia térmica, esto se debe principalmente a las propiedades térmicas del aire las cuales varían en función de la presión atmosférica y temperatura del aire.

En el anexo P se muestra el informe completo para el análisis de la pasta cerámica en la ciudad de Riobamba, con cuyos resultados se han seleccionado los siguientes equipos:

- Ventilador Principal

Tipo: Ventilador centrífugo de baja presión

Marca: Casals

Modelo: BV 15/15 900RPM 7,50KW

- Quemador

Tipo: Quemador de gasóleo

Marca: Baltur

Modelo: TBL 160P

- Bomba de alimentación

Tipo: Centrífuga

Marca: Pedrollo

Modelo: CP 600

- Ventilador de Extracción

Tipo: Ventilador centrífugo de media presión

Marca: Casals

Modelo: MBGR 562 T2 15kW

En el anexo Q, R, S, T se muestra las características y curvas de trabajo de los equipos seleccionados.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

En el presente trabajo se realiza la estandarización de secaderos por aspersión, ya que en el proceso de diseño no se limita a ningún tipo de sustancia, el único requerimiento es que la misma pueda ser bombeada para que llegue hasta el medio atomizante con un flujo constante.

Se realiza un análisis de cada uno de los procesos que intervienen en el secado por aspersión, con la finalidad de entender el fenómeno y así llegar a establecer todos los componentes y equipos necesarios.

Al realizar un secadero por aspersión para una sustancia determinada se requieren ciertas condiciones y propiedades que se establecen en el capítulo 3, las mismas que pueden obtenerse en tablas de manuales de secado o experimentalmente, las propiedades más escasas son las temperaturas de secado ya que no existe una fuente que abarque varias sustancias y su cálculo requiere necesariamente la comprobación experimental.

Se desarrolla una secuencia de cálculo para el dimensionamiento de la cámara de secado para procesar pasta cerámica y los resultados se comprueban con el secadero Sacmi ATM 12, obteniendo un secadero de características similares con un ahorro energético y reduciendo el espacio para la instalación.

Se realiza el proceso para la correcta selección de los equipos que se requieren para el secadero por aspersión.

Para determinar el flujo de aire requerido en el proceso de secado se realiza un balance de energía y masa del agua en el sistema aire alimentación, este valor

es muy importante ya que asegura el correcto secado de las gotas, además de ser un dato para la selección de los ventiladores.

Para el sistema de generación de aire caliente se realiza una secuencia de cálculo que permite obtener los parámetros requeridos para la correcta selección del ventilador principal y el calefactor.

En el sistema de alimentación se considera un sistema de bombeo general que nos permite obtener los parámetros necesarios para la selección de la bomba de alimentación, la misma que se debe seleccionar en función de las propiedades de la sustancia.

Para el sistema de separación del polvo se realiza el diseño de un ciclón de alta eficiencia tipo Stairmand ya que éste ofrece una alta eficiencia con una caída de presión baja en comparación a otros tipos de ciclones de alta eficiencia.

En el sistema de extracción de gases se determina las características del ventilador de extracción el mismo que debe admitir una caída de presión mayor al ventilador principal por el hecho de que la caída de presión del ciclón representa más del 70% de la caída de presión del sistema de extracción de aire.

Una vez que se realiza el dimensionamiento de la cámara de secado y los equipos auxiliares se desarrolla un software que realice todos los cálculos establecidos en este trabajo, y permita la presentación de los parámetros necesarios para la elaboración de un secadero por aspersion de una determinada sustancia.

El software desarrollado se denomina SprayDryer y se puede ejecutar en cualquier computador con plataforma Windows XP en adelante, ya que en el paquete de instalación se han incluido todos los requisitos para la correcta ejecución del mismo.

En el software además se puede introducir los costos de equipos, materiales y mano de obra para poder realizar un análisis de costos del proyecto de instalación de un secadero por aspersión.

6.2 Recomendaciones

Para una mayor efectividad en el proceso de secado por aspersión se recomienda que las temperaturas de secado sean obtenidas experimentalmente, además de verificar que las mismas no afecten al producto final ni a las propiedades requeridas.

Al seleccionar el atomizador rotatorio se debe tomar en cuenta el tipo de sustancia que se va a manejar para evitar el deterioro prematuro del equipo.

Para la selección de la bomba no se ha corregido los valores de caudal y altura por el coeficiente de corrección por viscosidad, por el hecho de que la correcta selección de la bomba depende, además del tipo de sustancia a manejar, y debido a que el proyecto no se enfoca en un solo tipo estas correcciones se deben realizar externamente.

En la selección de los ventiladores se debe aclarar que el caudal requerido y la caída de presión ya están corregidos con el coeficiente de corrección por altitud, por lo que si se utiliza un software auxiliar para la selección de estos equipos se debe tomar en cuenta este detalle.

Se recomienda que la investigación en el campo de los secaderos por aspersión se continúe para lograr construir un equipo de estos a escala de laboratorio mediante otro proyecto de grado, con la finalidad de profundizar el conocimiento y comprobar las expresiones propuestas para el dimensionamiento.

Luego de comprobar el correcto funcionamiento del software se recomienda su uso para la industria, cuando se requiera el dimensionamiento de un secadero por aspersión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALAMILLA, L. Aspectos sobre el uso de secadores por aspersión. Documento predoctoral. México: ENCB-IPN, 2001. Pág. 81-90.
- [2] LAND VAN'T, C.M. Selecting Dryers. En: Chemical Engineering. Vol. 9, No. 5. EE.UU.: 1984. Pág. 70-77.
- [3] BARZ, A. Métodos experimentales en la ingeniería alimentaria. España: 2000. Pág. 89-104.
- [4] MASTERS, K. Spray drying Handbook. Quinta edición. London: Longman Scientific & Technical, 1991. Pág. 340.
- [5] MCCABE, W. Operaciones básicas de ingeniería química. 4ta. ed. Mc Graw Hill. España: 1991. p. 198.
- [6] LONG, G. Atomización Teoría y Práctica. En: Ingeniería Química. Vol. 85, No. 6. EE.UU.: 1978. Pág. 73-77.
- [7] MASTERS, K. Scale-up of spray dryers. En: Drying technology. Vol. 12, No. 1. EE.UU.: 1994. Pág. 235-257.
- [8] GLUECKERT, F.A. A theoretical correlation of spray-dryer performance. EE.UU.: American Institute of Chemical Engineers Journal, 1962. Pág. 460-466.
- [9] MASTERS, K. Spray drying Handbook. Quinta edición. London: Longman Scientific & Technical. EE.UU.: 1991. Pág. 684.
- [10] VIKRAM, SHABDE. Optimal design and control of a spray drying process that manufactures hollow micro-particles. EE.UU.: 2006. Pág. 64
- [11] Varios Autores. Ventilación industrial. 1ª Edición en español. España: 1992. Pág. 5-37

BIBLIOGRAFÍA

- ALAMILLA, L., Aspectos sobre el uso de secadores por aspersión. Documento pre doctoral. México: ENCB-IPN, 2000.
- BARZ, A. Métodos experimentales en la ingeniería alimentaria. España: Acribia, 2000.
- CARRIER. "Manual de Aire Acondicionado" Marcombo. España: 1980.
- CRANE. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Mc Graw Hill. México: 1990.
- GLUECKERT, F.A. A theoretical correlation of spray-dryer performance. EE.UU.: American Institute of Chemical Engineers Journal, 1962.
- INCROPERA, F. Fundamentos de transferencia de calor Prentice hall. 4ta Edición, México: 1999
- LAND VAN'T, C.M. Selecting Dryers. En: Chemical Engineering. Vol. 9, No. 5. EE.UU.: 1984.
- LONG, G. Atomización Teoría y Práctica. En: Ingeniería Química. Vol. 85, No. 6. EE.UU.: 1978.
- MASTERS, K. Scale-up of spray dryers. En: Drying technology. Vol. 12, No. 1. EE.UU.: 1994.
- MASTERS, K. Spray drying Handbook. 5ta edition. London: Longman Scientific & Technical. EE.UU.: 1991.
- MCCABE, W. Operaciones básicas de ingeniería química. Mc Graw Hill. 4ta edición. España: 1991.

NAKAMURA, S. Métodos Numéricos Aplicados con Software. 1ra edición. Pearson. México: 1992.

SMACNA. HVAC SYSTEMS DUCT DESIGN. 3ra Edición. EE.UU.: 1990.

SOM G., SERRANO J, Curso de Introducción a .NET con Visual Basic 2010. España: 2011.

PERRY. Manual del ingeniero químico. Mc Graw Hill. 6ta Edición 3ra en español. Tomo 1-4. EE.UU.: 2000.

RODRIGUEZ, J. Introducción a la termodinámica con algunas aplicaciones de ingeniería. México: Universidad Tecnológica Nacional, 2004.

SHABDE, Vikram. Optimal design and control of a spray drying process that manufactures hollow micro-particles EE.UU.: 2006.

Vagn Westergaard. Tecnología de la Leche en Polvo Evaporación y Secado por Atomización. Dinamarca: NIRO, 2004.

Varios Autores. Ventilación industrial. 1ra Edición en español. España: 1992.

LINKOGRAFÍA

FACTORES DE CORRECCIÓN POR VISCOSIDAD

www.bombaszeda.com/_upload/Departamento/1/Es_6Viscosidad.pdf

2011 – 08 - 24

DISCOS ATOMIZADORES INDUSTRIALES

<http://www.simes-sa.com.ar/esp/productos.atomizadores.php>

2011 – 10 - 01

DISEÑO DE CICLONES INDUSTRIALES

<http://www.mailxmail.com/curso-ciclones>

2011 – 06 - 12

PODER CALORÍFICO DE COMBUSTIBLES

<http://energia.mecon.ar/electricidad/boletines/quinquenales/1991-1995/tabla%20de%20conversiones%20energeticas.html>

2011 – 09 - 21

FACTOR DE CORRECCIÓN POR DENSIDAD EN VENTILADORES

http://www.vriventilacion.com/industrial/pdf/cps_cpt_corel/factores.pdf

2011 – 11 - 18